

文章编号:1007-9629(2021)02-0296-09

钢筋对混凝土中氯离子扩散的阻挡效应预测模型

吴林键^{1,2,3}, 鞠学莉^{1,2,3}, 马原飞^{1,2,3}, 管 理^{1,2,3}

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学
水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 为了从细观本质上定量分析钢筋对混凝土中氯离子扩散的影响程度, 通过开展人工模拟海洋潮汐环境干湿交替作用下混凝土和钢筋混凝土试件中氯离子自然扩散室内物理试验, 得到不同扩散时间下试件中氯离子的含量分布. 在此基础上, 基于细观图像技术定量研究了钢筋间接阻挡效应对氯离子扩散系数的影响. 以 Fick 第二扩散定律误差函数解析解为基础, 通过引入钢筋的间接和直接阻挡效应系数来对其进行修正, 建立了考虑钢筋阻挡效应的混凝土中氯离子含量预测模型. 模型预测值与试验实测值吻合良好, 验证了预测模型的正确性.

关键词: 混凝土; 钢筋; 氯离子; 阻挡效应; 耐久性

中图分类号: TU375

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.02.010

Prediction Model of Chloride Diffusion in Concrete Considering the Blocking Effects of Rebar

WU Linjian^{1,2,3}, JU Xueli^{1,2,3}, MA Yuanfei^{1,2,3}, GUAN Li^{1,2,3}

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic & Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To quantify the influence degree of rebar on chloride diffusion in concrete at the meso-scopic level, an indoor physical experiment of chloride natural diffusion into concrete and reinforced concrete specimens under drying-wetting cycles in artificial marine tidal environment was carried out. The chloride content distributions in concretes at different diffusion times were measured. The influence of indirect blocking effects of rebar on chloride diffusion coefficient was quantitatively explored based on the meso-scopic image technique. Using the indirect and direct blocking effect coefficients of rebar to improve the closed-form solution of Fick's second law, a prediction model of chloride concentration in concrete considering the influence of blocking effects of rebar was established. The accuracy of the proposed model was proved by comparing the predicted chloride content in the model with experimental results.

Key words: concrete; rebar; chloride; blocking effect; durability

氯盐环境下, 由于氯离子侵蚀所诱发的混凝土内钢筋锈蚀是导致钢筋混凝土结构发生耐久性失效破坏的最主要原因^[1]. 揭示钢筋混凝土中氯离子的

传输机理和侵蚀过程, 对于延缓因钢筋锈蚀所引起的混凝土保护层开裂, 提高结构在恶劣服役环境下的耐久性具有重要的理论意义和工程应用价值^[2].

收稿日期: 2019-11-15; 修订日期: 2020-01-16

基金项目: 重庆市自然科学基金博士后科学基金项目(cstc2019jcyj-bshX0063); 中国博士后科学基金面上资助项目(2019M653824XB); 重庆交通大学河海学院研究生科研创新基金项目(YC2020005)

第一作者: 吴林键(1990—), 男, 重庆沙坪坝人, 重庆交通大学副教授, 硕士生导师, 博士. E-mail: wljabgf@126.com

从细观层面上来看,钢筋混凝土是由水、水泥、粗、细集料,钢筋等构成的多相复合材料^[3]. 钢筋作为其中的主要组成部分,其存在会导致氯离子在钢筋表面出现堆叠和聚集现象,使钢筋前沿区域内氯离子浓度值较相同深度处无钢筋时要大,这一现象称为钢筋阻挡效应^[4]. 该现象早在 20 世纪 90 年代末被 Hansen 等^[5]首次发现,并指出在实际工程中,若不考虑钢筋对氯离子侵蚀的阻挡效应,则评估得到的钢筋初锈时间会比考虑钢筋阻挡效应时更长,这样的预测结果较实际情况更危险.

Wang 等^[4,6-9]通过开展不同暴露环境下的钢筋混凝土中氯离子侵蚀物理试验,探讨了钢筋对混凝土中氯离子扩散特性的影响。Kranc 等^[10-16]基于有限元基本原理,通过建立钢筋混凝土的宏观、细观数值模型,对氯离子的扩散行为进行数值模拟仿真分析。然而,已有研究成果大多在宏观层面上定性指出了钢筋对氯离子扩散的阻挡效应,少量根据物理试验建立的预测模型中也并未从细观本质上去量化钢筋阻挡效应对氯离子扩散的影响程度。

针对上述问题,本文通过开展人工模拟海洋潮汐环境干湿交替作用下混凝土和钢筋混凝土试件中氯离子自然扩散室内物理试验,得到不同扩散时间下试件中氯离子的含量分布;在此基础上,深度研究钢筋对混凝土中氯离子侵蚀扩散的阻挡效应,基于图像技术在细观层面上量化了钢筋间接阻挡效应对氯离子扩散系数的影响;通过引入钢筋的间接和直接阻挡效应系数对 Fick 第二扩散定律的误差函数解析解表达式进行修正,建立了考虑钢筋阻挡效应的混凝土中氯离子含量预测模型,并应用试验数据验证了该预测模型的正确性。

1 试验

1.1 原材料及配合比

采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥 (OPC) 作为胶凝材料; 采用公称粒径 5~20 mm 的连续级配天然碎石作为粗集料, 其表观密度为 $2.69 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 采用连续级配的淡水河砂作为细集料, 其细度模数为 2.6; 选用 HPB300 热轧光圆钢筋作为钢筋原材料, 其直径 $d_r = 16 \text{ mm}$. 为避免原材料中含有的氯化物对最终试验结果的影响, 采用蒸馏水作为拌和用水. 根据 JGJ55—2011《普通混凝土配合比设计规程》, 设计强度等级 C35 的混凝土, 其配

合比见表 1. 其中, 水灰比¹⁾ $m_w/m_c=0.4$, 粗集料体积分数 $\varphi_{cr}=0.42$.

表 1 混凝土配合比
Table 1 Mix proportion of concrete

Cement	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate
595	238	435	1 135

1.2 试件制备

根据表 1 中的配合比制备得到混凝土(C)和钢筋混凝土(RC)试件,前者几何尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,后者几何尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 360\text{ mm}$,钢筋混凝土试件的保护层厚度为 20 mm .混凝土试件记作 C-35、C-70、C-100、C-135、C-170、C-200 和 C-240,对应的氯离子扩散时间 $t=35、70、100、135、170、200、240\text{ d}$;钢筋混凝土试件记作 RC-100、RC-135、RC-170、RC-200、RC-240,对应的氯离子扩散时间 $t=100、135、170、200、240\text{ d}$.将浇筑好的全部试件经充分振捣密实后移至 $(20\pm 3)^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $\text{RH}>90\%$ 的标准养护箱中养护 24 h 后拆模.随后将其浸泡于饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中持续养护 28 d 后取出,待试件风干后刮去其表面浮浆,利用切割机沿试件 400 mm 长边方向,将其分成 3 个 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的平行试件.各试件在除扩散面以外的其余 5 个表面上涂抹环氧树脂以保证氯离子在混凝土中的一维扩散.其中,混凝土试件可取任意表面作为扩散面,钢筋混凝土试件的扩散面见图 1.

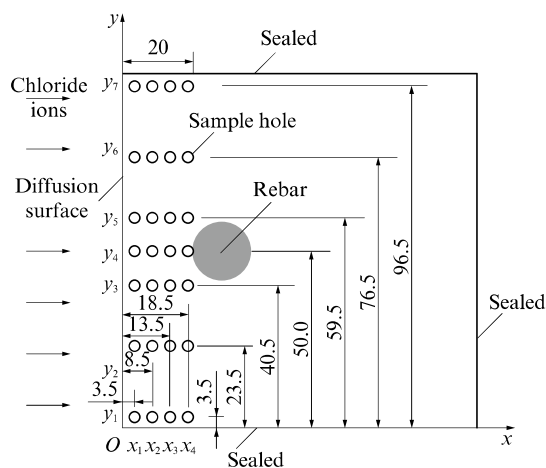


图 1 钢筋混凝土试件取样方式
Fig. 1 Sampling of reinforced concrete specimens

1.3 试件暴露环境及氯离子浓度测试

人工配置质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液来模

1)文中涉及的比值、含量等除特别说明外均为质量比或质量分数。

拟天然海水,通过在固定的时刻向腐蚀试验池内灌入或排出 NaCl 溶液来人工模拟海洋潮汐环境的干湿交替过程^[17].取干湿循环周期为 24 h,其中浸泡 12 h,风干 12 h.为保证腐蚀环境中氯离子的浓度,试验过程中人工海水需 7 d 更换 1 次.试验控制环境温度(20±2)℃,相对湿度 95%±5%.

当扩散时间分别达到 35、70、100、135、170、200、240 d 时,取出对应试件进行清洗并干燥.对于混凝土试件,从其扩散表面起沿氯离子扩散深度(x)方向逐层磨粉取样,当 $x=0\sim6$ mm 及 $x=18\sim19$ mm 时,按 1 mm/层进行研磨,其余深度处按 2 mm/层进行研磨,共计 13 层;对于钢筋混凝土试件,根据图 1 所示的孔位分布,采用直径为 3 mm 的金刚钻头沿着平行于钢筋长度方向钻取不同孔位处的粉末样品,钻孔深度为 3 cm.

根据 JTJ 270—1998《水运工程混凝土试验规程》,测定粉末样品中的自由氯离子含量(C).备注:在钢筋混凝土试件取样孔位布设过程中,分别考虑了 $x_1=3.5$ mm、 $x_2=8.5$ mm、 $x_3=13.5$ mm 和 $x_4=18.5$ mm 这 4 个等效深度(见图 1),这 4 个值包含在混凝土试件的 13 个取样深度当中,以便对比分析.

2 结果与分析

2.1 混凝土中氯离子含量分布

实测得到各混凝土试件中氯离子含量(C)分布见图 2.由图 2 可知:由于干湿交替的影响,氯离子在混凝土内传输的对流作用将导致距离试件表层约 2 mm 的对流区(CZ)内氯离子含量随扩散深度增加而逐渐增大,这与已有文献中所得结论相吻合^[18-19];而在扩散深度大于 2 mm 的稳定扩散区(SDZ)内,氯离子含量随扩散深度增加而逐渐减小,随扩散时间增加而逐渐增大.

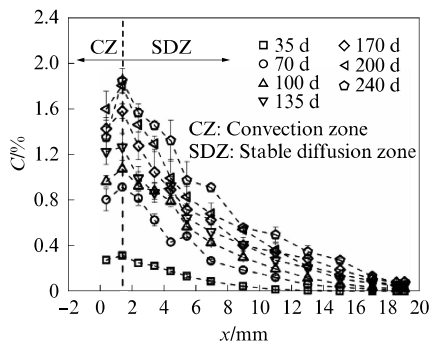


图2 混凝土试件中实测氯离子含量分布
Fig. 2 Experimental chloride content profiles in concrete specimens

2.2 混凝土中氯离子含量预测模型

图 2 中实测的混凝土中氯离子含量分布可基于 Fick 第二扩散定律^[4]来定量描述:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中: D 为氯离子扩散系数, m^2/s .

考虑混凝土中的初始氯离子含量 C_0 为 0,即 $C(x>0, t=0)=C_0=0$;考虑表面氯离子含量 C_s 的时变特性,则有 $C(x=0, t\geq 0)=C_s(t)$;同时考虑氯离子扩散系数的时变规律,则有 $D(t)=D_{\text{ref}} \cdot (t_{\text{ref}}/t)^a$ ^[4],其中 D_{ref} 为参考氯离子扩散系数, t_{ref} 为参考扩散时间,通常取 $t_{\text{ref}}=28$ d^[4], a 为龄期系数.结合式(1),可得到同时满足上述条件的 Fick 第二扩散定律误差函数解析解:

$$\begin{cases} C(x, t) = C_s(t) \cdot \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2 \sqrt{D_{\text{app}}(t) \cdot t}} \right) \right] \\ D_{\text{app}}(t) = \frac{D_{\text{ref}}}{1-a} \cdot \left(\frac{t_{\text{ref}}}{t} \right)^a \end{cases} \quad (2)$$

式中: $D_{\text{app}}(t)$ 为表观氯离子扩散系数.

基于最小二乘法,采用式(2)中 $C(x, t)$ 的表达式对图 2 中实测氯离子含量进行拟合,可回归得到表面氯离子含量 C_s 和表观氯离子扩散系数 D_{app} 的散点随 t 的变化规律,见图 3.从图 3 可知: C_s 随着 t 的增加而逐渐增大;而 D_{app} 随着 t 的增加而逐渐减小.

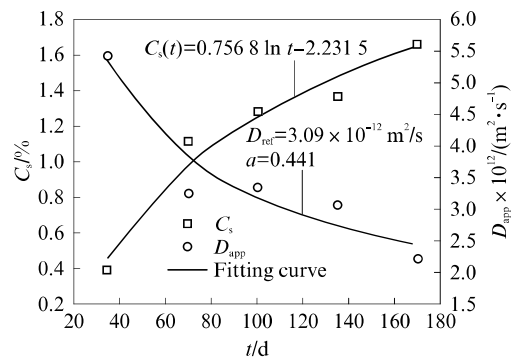


图3 表面氯离子含量和表观氯离子扩散系数的时变规律及其拟合函数

Fig. 3 Time-dependency and fitting curves of surface chloride content and apparent chloride diffusion coefficient

采用对数函数^[20]回归得到 $C_s(t)$ 的时变模型: $C_s(t) = 0.7568 \ln t - 2.2315$ (见图 3).同样,利用式(2)中 $D_{\text{app}}(t)$ 的表达式对图 3 中 D_{app} 进行回归分析,可拟合得到 $D_{\text{ref}} = 3.09 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, $a = 0.441$.将回归得到的 $C_s(t)$ 、 D_{ref} 和 a 代入式(2)中,可建立混凝土中氯离子扩散浓度预测模型(模型 1).

为了验证模型 1 预测结果的正确性,将基于模型 1 的氯离子含量预测值同混凝土试件中氯离子含

2.4 钢筋混凝土中氯离子含量预测模型

基于模型1计算得到当 $t=100, 135, 170$ d时钢筋混凝土试件中等效扩散深度 $x=3.5, 8.5, 13.5, 18.5$ mm位置的氯离子含量预测值,将之与钢筋混凝土试件内氯离子含量实测值进行对比,见图6。由图6可见:钢筋混凝土中氯离子含量实测值随着扩散时间 t 的增加而增加,随着扩散深度 x 的增加而

减小; $x=3.5, 8.5, 13.5$ mm位置距离钢筋前沿相对较远,氯离子含量的实测值与模型1的预测值基本吻合,二者相对误差也大多在 $\pm 25\%$ 的范围内;当 $x=18.5$ mm时(距离钢筋最近的等效扩散深度处),氯离子含量的实测值较模型1预测值更大,且相对误差均超过 $\pm 25\%$,表明采用模型1无法有效预测钢筋前沿位置的氯离子含量。

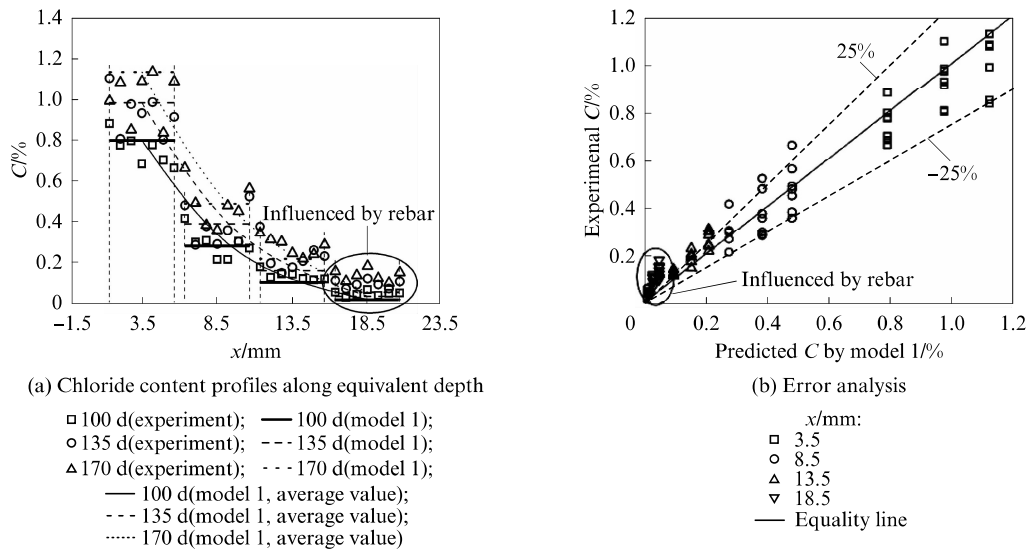


图6 钢筋混凝土试验组试件中氯离子含量实测值与模型1预测值对比

Fig. 6 Comparison of experimental and model 1 predicted chloride content for RC specimens of experimental groups

图7中对比了当 $x=18.5$ mm(对应钢筋前沿位置)时混凝土和钢筋混凝土试件中氯离子含量实测值(见图中无线条柱与左斜线柱)。由图7可知:钢筋前沿位置处的氯离子含量明显较高,其值约为无钢筋时的2.3~2.7倍。已有研究表明^[6-7]:直径为16 mm的钢筋会令其前沿位置处氯离子含量增加约1.9~3.8倍^[6]和2.17~2.69倍^[7]。综上所述,钢筋对氯离子扩散的阻挡效应不可忽略。然而,模型1仅可用于合理评估除钢筋前沿位置以外深度处的氯离子含量,对钢筋前沿位置处氯离子含量的预测值较实测值偏小。因此,有必要单独针对钢筋前沿位置的氯离子含量建立合适的预测模型,这对于实际工程中合理预测钢筋混凝土结构物的耐久性服役寿命意义重大。

钢筋对混凝土内氯离子侵蚀扩散的阻挡效应可分为间接和直接2个部分^[4]。下文将分别针对这2个部分的相关内容开展深入研究工作。

2.4.1 基于细观图像技术的钢筋间接阻挡效应量化方法

钢筋的存在会改变其前沿位置处混凝土的细观构成,即改变该位置处粗集料的含量及分布,从而影

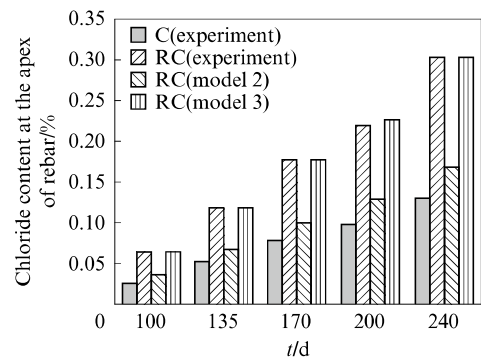


图7 钢筋前沿氯离子含量对比

Fig. 7 Comparison of the chloride content at the apex of rebar($x=18.5$ mm)

响该位置处的氯离子扩散系数,该现象被称作钢筋间接阻挡效应^[4]。为了量化钢筋间接阻挡效应对氯离子扩散系数的影响,首先需确定钢筋前沿位置处粗集料含量的具体分布情况。

采用切割机对1.2节中制备好的 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 360\text{ mm}$ 的试验组钢筋混凝土试件进行分割,从同一块试件中切出来3块 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的试件用于氯离子自然扩散物理试验,见图8(a);余下的1块 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的试

件再次切成2份用作图像分析,见图8(b);利用研磨抛光机对试件切面进行加工,将其表面处理成粗集料和钢筋,这二者与水泥砂浆之间呈现出明显的颜色差异性;随后采用固定焦距的高分辨率照相机拍摄得到试件切面的高清照片,见图8(c).对该照片进行灰度化、动态二值化、消除颗粒粘连、消除边界黑点、消除飞点、消除空心、图像平滑等处理,可获得试件切面的黑白图,见图8(d),其中白色代表钢

筋和粗集料,黑色则表示水泥砂浆.以钢筋的圆周作为起始位置,保持与钢筋圆心位置相同,以 $r_r + \Delta_i$ 作为半径逐步向外偏移绘制得到一系列同心圆.其中 r_r 为钢筋半径; $r_r = 8 \text{ mm}$; Δ_i 为增量, $\Delta_1 = 1 \text{ mm}$ 、 $\Delta_2 = 2 \text{ mm}$ 等,以此类推.随后,基于对黑白图像中的颜色识别算法,可计算得到各等间距的同心圆环内粗集料面积占圆环总面积的百分比,即同心圆环内粗集料面积分数 A_{ca} .

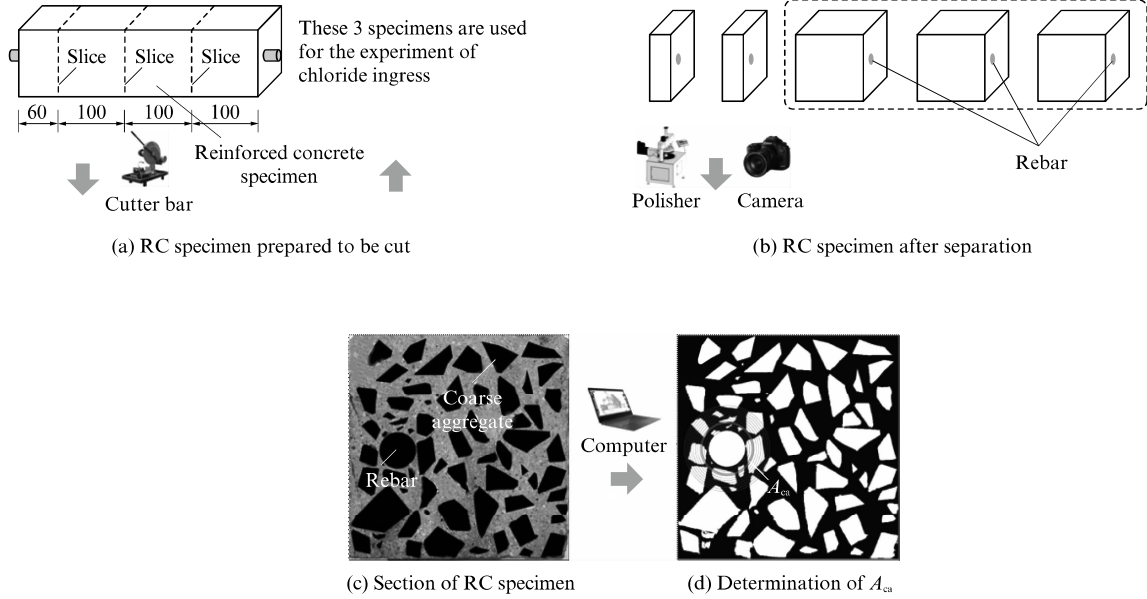


图8 钢筋外部同心圆环内粗集料面积分数 A_{ca} 的实测方法

Fig. 8 Measured procedure of the area fraction of coarse aggregate within the concentric annulus near the external rebar, A_{ca} (size:mm)

图9展示了用于图像分析的混凝土试件切面中 A_{ca} 的实测值(图中散点)及其平均值(图中点线)随扩散深度 x 的变化规律.由图9可知: A_{ca} 平均值随 x 的增加呈现出先平缓后降低的趋势.其中,平缓段的 A_{ca} 值与试件中粗集料体积分数 $\varphi_{ca} = 0.42$ 十分

接近; A_{ca} 出现显著下降时所对应的 x 取值范围大约为16~20 mm,这表明当钢筋存在时会削弱其前沿约4 mm同心圆环范围内粗集料的含量.根据文献[20]可知,氯离子扩散系数随着粗集料含量的减小而线性增加,因此在钢筋前沿位置处($x = 16 \sim 20 \text{ mm}$)氯离子扩散系数应相比于无钢筋时更大.

为了量化钢筋对氯离子扩散的间接阻挡效应,定义钢筋的间接阻挡效应系数 I_{lb} :

$$I_{lb}(x/d_r) = D_{ref}[A_{ca}(x/d_r)]/D_{ref} \quad (3)$$

式中: x/d_r 为无因次化的扩散深度; $D_{ref}[A_{ca}(x/d_r)]$ 表示粗集料面积分数为 A_{ca} 时的参考氯离子扩散系数, $A_{ca} = A_{ca}(x/d_r)$.

根据文献[20]可知,当混凝土中粗集料的体积分数为 φ_{ca} 时,参考氯离子扩散系数 $D_{ref}(\varphi_{ca}) = D_{ref}(0) \cdot f(\varphi_{ca})$.其中, $D_{ref}(0)$ 表示当 $\varphi_{ca} = 0$ 时的参考氯离子扩散系数, $f(\varphi_{ca})$ 为粗集料体积分数影响系数,干湿交替作用下 $f(\varphi_{ca}) = 1 - 0.8525\varphi_{ca}$.故式(3)可改写为:

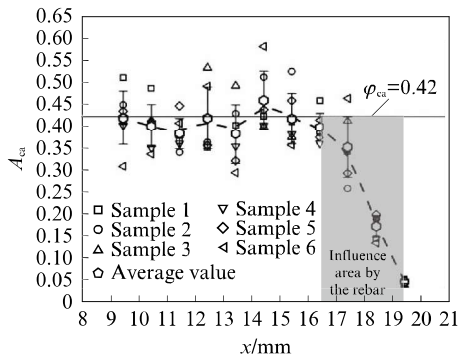


图9 钢筋混凝土试件中 A_{ca} 沿氯离子扩散深度 x 的变化规律

Fig. 9 Variation trend between A_{ca} and x in reinforced concrete specimens

$$I_{lb}(x/d_r) = 1.558 - 1.328 \times A_{ca}(x/d_r) \quad (4)$$

根据图9中实测确定的钢筋影响范围($x=16\sim 20$ mm),将 $x=16.5, 17.5, 18.5, 19.5$ mm对应的 A_{ca} 值代入式(4)中,可计算得到 I_{lb} 随 x/d_r 的变化规律,见图10.由图10可知: I_{lb} 随着 x/d_r 的增加而逐渐增加,这表明当 x 越接近钢筋位置时,钢筋对该深度处粗集料的含量及分布的影响就越大.根据 I_{lb} 的变化规律,采用线性函数对其散点进行回归拟合,可得到钢筋间接阻挡效应系数的拟合函数为:

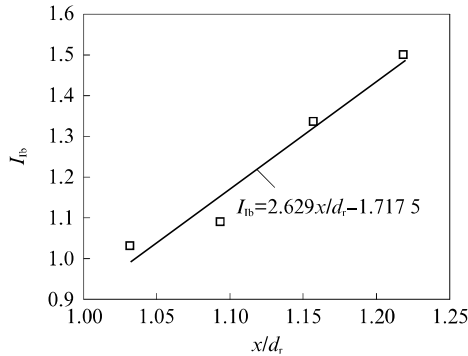


图10 钢筋间接阻挡效应系数及其拟合函数表达式
Fig. 10 Indirect blocking effect coefficients of rebar and its fitted function

$$I_{lb}(x/d_r) = 2.629 \cdot (x/d_r) - 1.7175 \quad (5)$$

联立式(3)和式(5),令钢筋混凝土中钢筋前沿位置处的参考氯离子扩散系数 $D_{ref(rc)} = D_{ref}[A_{ca}(x/d_r)] = D_{ref} \cdot I_{lb}(x/d_r)$,将其代入模型1中去替代原有的混凝土参考氯离子扩散系数 D_{ref} ,并保持其余各参数均不变,可建立得到考虑钢筋间接阻挡效应时,在钢筋前沿位置处($x=16\sim 20$ mm)的氯离子含量预测模型(模型2),如下:

$$\begin{cases} C(x,t) = C_s(t) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\frac{D_{ref}}{1-a} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^a \cdot t}} \right) \right] \\ C_s(t) = 0.7568 \cdot \ln t - 2.2315 \\ D_{ref(rc)} = D_{ref} \cdot I_{lb}(x/d_r) \\ I_{lb}(x/d_r) = 2.629 \cdot (x/d_r) - 1.7175 \\ D_{ref} = 3.09 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}, a = 0.441 \end{cases} \quad (6)$$

将钢筋前沿位置处氯离子含量的实测值与模型2的预测值进行对比分析,结果见图7中左斜线柱与右斜线柱.由图7可见:基于模型2的氯离子含量预测值比混凝土试件的实测值要大;比钢筋混凝土试件的实测值要小.上述现象充分说明钢筋对氯离子含量的影响并非仅归因于其间接阻挡效应,故还需在式(2)的基础上对预测模型进一步修正.

2.4.2 考虑钢筋阻挡效应的氯离子含量预测模型

除了钢筋的间接阻挡效应外,由于钢筋是一种不透氯离子的介质,故其存在会直接阻挡混凝土中氯离子的扩散,使得氯离子在钢筋表面附近堆叠,最终导致钢筋前沿位置处的氯离子含量较无钢筋时更大,上述现象被称之为钢筋的直接阻挡效应^[4].为了量化钢筋直接阻挡效应对氯离子含量的影响,定义钢筋的直接阻挡效应系数 I_{Db} 为:

$$I_{Db} = C_c(x,t)/C_{lb}(x,t) \quad (7)$$

式中: $C_c(x,t)$ 为当扩散时间为 t 时,在钢筋前沿位置处($x=16\sim 20$ mm)氯离子含量的实测值; $C_{lb}(x,t)$ 为在对应的扩散时间 t 时基于模型2计算得到的钢筋前沿位置处($x=16\sim 20$ mm)氯离子含量预测值.

分别将扩散时间 $t=100, 135, 170$ d情况下 $C_c(x,t)$ 和 $C_{lb}(x,t)$ 的值代入式(7)中,可计算得到 I_{Db} 的结果,见表2.

表2 钢筋直接阻挡效应系数
Table 2 Direct blocking effect coefficient of rebar

Item	100 d	135 d	170 d
I_{Db}	1.757	1.803	1.781
Relative errors/%	-1.296	1.269	0.026

由表2可知: I_{Db} 随 t 增加无显著的变化规律,可认为 I_{Db} 与 t 不相关.经分析,钢筋的直接阻挡效应从本质上可看作是钢筋作为障碍物来直接阻挡氯离子的传输和迁移,故这种物理性阻碍机制对钢筋前沿位置处氯离子含量的影响程度理应与钢筋本身的特性,如:钢筋的致密性、直径以及几何形状等相关,而与其他影响因素无关.因此,表2所反映的钢筋直接阻挡效应系数变化规律是合理的. I_{Db} 的散点与其平均值之间的相对误差范围在 $-1.296\% \sim 1.269\%$ 之间,故可取 I_{Db} 的平均值1.780作为钢筋的直接阻挡效应系数.

将 $I_{Db}=1.780$ 引入模型2中从而建立得到考虑钢筋间接和直接阻挡效应时,在钢筋影响范围内($x=16\sim 20$ mm)的氯离子浓度预测模型(模型3):

$$\begin{cases} C(x,t) = I_{Db} \cdot C_s(t) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\frac{D_{ref}}{1-a} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^a \cdot t}} \right) \right] \\ I_{Db} = 1.780, C_s(t) = 0.7568 \cdot \ln t - 2.2315 \\ D_{ref(rc)} = D_{ref} \cdot I_{lb}(x/d_r), \\ I_{lb}(x/d_r) = 2.629 \cdot (x/d_r) - 1.7175 \\ D_{ref} = 3.09 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}, a = 0.441 \end{cases} \quad (8)$$

同样,将氯离子含量实测值与模型3的预测值进行对比,结果见图7中左斜线柱与竖线柱。由图7可见:基于模型3的氯离子含量预测值在数值大小和随扩散时间的变化趋势上都与实测值吻合,充分验证了预测模型3及其评估结果的正确性。

3 结论

(1)混凝土和钢筋混凝土试件中氯离子含量均随着扩散深度的增加而逐渐降低,随着扩散时间的增加而逐渐增加。

(2)通过对混凝土试件中实测氯离子含量分布进行回归分析,建立了混凝土中氯离子含量预测模型(模型1)。

(3)基于细观图像技术,量化了钢筋的间接阻挡效应系数 I_{ib} ;根据钢筋混凝土试件中钢筋前沿位置处氯离子含量实测值推算得到了钢筋的直接阻挡效应系数 I_{db} ;在此基础上,建立了考虑钢筋直接和间接阻挡效应的氯离子含量预测模型(模型3)。

(4)当扩散深度在钢筋影响范围内(16~20 mm)时,应采用模型3来预测钢筋混凝土中的氯离子含量;当扩散深度超出上述钢筋影响范围时,则应使用模型1来预测钢筋混凝土中的氯离子含量。

参考文献:

- [1] 徐港,杨泽稳,张瑞,等.两种表面状态钢筋在氯盐环境下的腐蚀特征[J].建筑材料学报,2019,22(2):254-259.
XU Gang, YANG Zewen, ZHANG Rui, et al. Corrosion characteristics of two kinds of surface of steel bars in chloride environment[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2): 254-259. (in Chinese)
- [2] 周双喜,韩震,魏星,等.骨料含量和界面区体积对混凝土氯离子扩散性能的影响[J].建筑材料学报,2018,21(3):351-357.
ZHOU Shuangxi, HAN Zhen, WEI Xing, et al. Influence of aggregate contents and volume of interfacial transition zone on chloride ion diffusion properties of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(3): 351-357. (in Chinese)
- [3] 金浏,张仁波,杜修力,等.角部钢筋锈蚀引发混凝土保护层开裂行为研究[J].建筑材料学报,2016,19(2):255-261.
JIN Liu, ZHANG Renbo, DU Xiuli, et al. Investigation on cracking behavior of concrete cover induced by corner located rebar corrosion[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 255-261. (in Chinese)
- [4] WANG Y Z, LI Q M, LIN C A P. Chloride diffusion analysis of concrete members considering depth-dependent diffusion coefficients and effect of reinforcement presence[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(5): 04015183.
- [5] HANSEN E J, SAOUMA V E. Numerical simulation of reinforced concrete deterioration-Part I: Chloride diffusion[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(2): 173-180.
- [6] YU H, HARTT W H. Correction of chloride threshold concentration and time-to-corrosion due to reinforcement presence[J]. Materials and Corrosion, 2011, 62(5): 423-430.
- [7] WANG Y Z, GONG X L, WU L J. Prediction model of chloride diffusion in concrete considering the coupling effects of coarse aggregate and steel reinforcement exposed to marine tidal environment[J]. Construction and Building Materials, 2019, 216: 40-57.
- [8] 王显利,吴智敏,郑建军.钢筋影响下混凝土中氯离子质量分数累积研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(5):742-745.
WANG Xianli, WU Zhimin, ZHENG Jianjun. Experiment and numerical simulation on chloride concentration cumulating in concrete affected by reinforcement[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2009, 28(5): 742-745. (in Chinese)
- [9] 屈锋,牛荻涛,杨宇曦.钢筋对受盐冻混凝土氯离子扩散的影响[J].防灾减灾工程学报,2015,35(4):484-488,542.
QU Feng, NIU Ditao, YANG Yuxi. Effect of steel bar on diffusion of chlorion in salt frosted concrete[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(4): 484-488, 542. (in Chinese)
- [10] KRANC S C, SAGUES A A, PRESUEL-MORENO F J. Decreased corrosion initiation time of steel in concrete due to reinforcing bar obstruction of diffusional flow[J]. ACI Materials Journal, 2002, 99(1): 51-53.
- [11] OH B H, JANG B S. Chloride diffusion analysis of concrete structures considering effects of reinforcements[J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(2): 143-149.
- [12] 田冠飞,安雪晖.钢筋存在对氯离子扩散阻滞影响的有限元分析[J].混凝土,2006(5):1-3,6.
TIAN Guanfei, AN Xuehui. Finite element analysis of steel obstruction effects on chloride diffusion in concrete[J]. Concrete, 2006(5): 1-3, 6. (in Chinese)
- [13] 冷冰.混凝土中氯离子浓度分布预测方法研究[D].长春:吉林大学,2008.
LENG Bing. Study on prediction method of chloride concentration distribution in concrete[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- [14] 赵翔宇.基于氯离子渗透的混凝土结构耐久性研究[D].重庆:重庆大学,2011.
ZHAO Xiangyu. Study on durability of concrete structure based on chloride ion permeation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [15] 何明伟.钢筋混凝土中氯离子传输三维细观数值模拟研究[D].天津:天津大学,2017.
HE Mingwei. Study on three-dimensional microscopic numerical simulation of chloride ion transport in reinforced concrete[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)
- [16] 兰成明,李惠,鞠杨,等.考虑截面形状及钢筋阻滞作用影响的混凝土内钢筋初锈时间预测[J].土木工程学报,2013,46(12):50-58.

(下转第332页)