

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023073123051982

文章编号:1674-599X(2023)05-0001-09

引用格式:刘鹏,伍军,陈颖,等.氯盐侵蚀混凝土表层氯离子对流区深度和时变性能[J].交通科学与工程,2023,39(5):1-9,30.

Citation:LIU Peng, WU Jun, CHEN Ying, et al. Study on the convective depth and time-varying properties of chloride convection zone on concrete surface[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(5): 1-9, 30.

## 氯盐侵蚀混凝土表层氯离子对流区深度和时变性能

刘鹏<sup>1,2,3,6</sup>, 伍军<sup>2</sup>, 陈颖<sup>1,4</sup>, 杨开屏<sup>5</sup>, 吕道锋<sup>6</sup>, 范宇华<sup>6</sup>, 余志武<sup>1,2,3</sup>

(1. 高速铁路建造技术国家工程研究中心, 湖南长沙 410075; 2. 中国中铁股份有限公司, 北京 100039;  
3. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075; 4. 中南林业科技大学土木工程学院, 湖南长沙 410004;  
5. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055; 6. 中铁十局集团有限公司, 山东济南 250101)

**摘要:**为研究氯盐侵蚀环境中的混凝土表层氯离子分布及其对流区深度,分析混凝土内部水分影响深度和表层氯离子含量变化规律,建立混凝土表层氯离子对流区深度模型,研究滨海环境中的混凝土表层氯离子含量与高程、距海边距离和时间的关联度,推导出相应的混凝土表层氯离子含量的时空分布函数表达式。研究表明:氯盐侵蚀环境中的混凝土氯离子对流区深度与混凝土内部水分影响深度之间存在密切关联。氯盐环境中高程和距海距离对混凝土表层氯离子含量的影响可采用S曲线进行描述。混凝土表层氯离子最大含量随时间增加而增大,但最终趋于稳定。混凝土表层氯离子深度变化模型可准确揭示氯盐环境中的混凝土表面氯离子含量变化规律,可为预测混凝土表层氯离子含量分布提供参考。

**关键词:**混凝土;氯离子;对流区深度;时变性能

中图分类号:TU528

文献标志码:A

### Study on the convective depth and time-varying properties of chloride convection zone on concrete surface

LIU Peng<sup>1,2,3,6</sup>, WU Jun<sup>2</sup>, CHEN Ying<sup>1,4</sup>, YANG Kaiping<sup>5</sup>, LYU Daofeng<sup>6</sup>, FAN Yuhua<sup>6</sup>, YU Zhiwu<sup>1,2,3</sup>

(1. National Engineering Research Center of High-Speed Railway Construction Technology, Changsha 410075, China;  
2. China Railway Group Co., Ltd., Beijing 100039, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 4. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 5. China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China; 6. China Railway No.10 Engineering Group Co., Ltd., Jinan 250101, China.)

**Abstract:** The distribution and convective depth of chloride ions on the concrete surface under the chloride salt erosion environment were investigated, and the convective depth model of chloride ions on the concrete surface was proposed by analyzing the change of the water-influenced depth and chloride ion concentration. Simultaneously, the internal relationships of the chloride ion concentration on the concrete surface and the elevation, distance from the sea and time were also studied. Then, the corresponding spatial and temporal distribution function of chloride ion concentration on concrete surface was established. The results showed that there was a close correlation between the depth of the chloride convection zone of concrete in chloride salt erosion environments and the water-influenced depth in concrete. The relationship between the chloride ion concentration on the concrete surface and

收稿日期:2023-07-31

**基金项目:**国家自然科学基金课题(52178182,52108262,U1934217);中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(2020-重大专项-02,2021-重大专项-02,2022-重大专项-09,2021-重点-11,2022-重点-46);中铁工程设计咨询集团有限公司科技开发计划项目(研2023-26);湖南省自然科学基金-杰出青年基金(2022JJ10075);湖南科技创新计划项目(2023SK2014)

**作者简介:**刘鹏(1982—),男,高速铁路建造技术国家工程研究中心教授,博士生导师。E-mail:lop868@163.com

the elevation and distance from the sea can all be characterized by the S-curve. The maximum concentration of chloride ions on the concrete surface increased with the increase of time, but its value eventually tended to be a constant. The convective depth model of chloride ions on concrete surface can accurately present the change rule of concrete surface chloride ion concentration in chloride salt environment, which can provide a reference for predicting the distribution of concrete surface chloride ion concentration.

**Key words:** concrete; chloride ion; convective depth; time-varying properties

氯盐侵蚀是导致服役中的混凝土结构耐久性退化的主要因素之一。现有研究多采用FICK第二定律分析其对混凝土耐久性的影响<sup>[1-4]</sup>。然而,该模型涉及的混凝土表面氯离子含量和深度范围尚未达成共识、合理的理论计算方法。现有研究认为混凝土表面氯离子含量服从广义极值分布<sup>[5]</sup>、正态分布<sup>[6]</sup>和对数正态分布<sup>[7]</sup>等,且混凝土表面氯离子含量随时间和高程不同而不同。混凝土表层某一深度范围内的氯离子含量变化是多因素耦合作用的结果,该区域氯离子含量的峰值点可认为是对流区和扩散区的分界点。峰值内侧氯离子传输以扩散为主,峰值外侧氯离子传输以毛细管作用为主。混凝土表面氯离子含量和深度的取值不同,可导致计算出的氯离子分布和扩散系数等参数均存在很大差异。如何准确确定混凝土表层氯离子含量与对流区深度,对进行混凝土结构寿命预测和耐久性评估具有重要意义。

目前,针对混凝土表层氯离子对流区深度的研究成果主要基于实测值,缺乏相应的理论基础。欧洲Duracrete标准<sup>[8]</sup>建议正常情况下的混凝土表层氯离子对流区深度 $\Delta x$ 为14 mm。许多学者<sup>[9-10]</sup>给出的对流区深度为20 mm和8~10 mm。范宏等<sup>[11]</sup>通过探讨青岛某码头氯离子侵蚀曲线规律,指出相应的对流区深度均值为15 mm。LI等<sup>[12]</sup>将水分影响深度直接视为混凝土表面氯离子对流区深度。实际工程中, $\Delta x$ 与结构所处环境、干湿循环时间比、混凝土自身特性和所受载荷等因素密切相关。然而,已有研究成果主要基于实测结果获得,对于新建混凝土结构,无法预知其值,测试精度的准确性也会影响 $\Delta x$ 的预测值。因此,本研究拟通过构建混凝土表层氯离子对流区深度模型,研究氯盐环境中的混凝土表层氯离子变化规律和混凝土表层内部水分影响深度变化规律,探讨自然环境中混凝土表层氯离子含量随高程、距海边水平距离和时间的变化规律,拟合出相应的函数关系模型,为混凝土结构氯离子

侵蚀研究和耐久性评估提供参考。

## 1 理论分析

### 1.1 混凝土表层氯离子对流区深度模型

混凝土表层氯离子对流区深度一直是氯盐环境中混凝土耐久性研究的焦点。CASTRO等<sup>[13]</sup>根据暴露混凝土结构中的氯离子分布,将氯离子分布划分为表层干湿变动区(对流区)和内部潮湿区,并认为这种分布与反复干湿循环作用和混凝土孔结构有直接关系。外界氯离子通过混凝土孔隙传输进入混凝土内部,形成氯离子浓度梯度,导致混凝土中氯离子主要通过扩散进行传输。若假定氯离子在孔隙均匀分布的半无限混凝土中只进行一维扩散,浓度梯度仅沿着对流层内部方向变化,且混凝土表面氯离子含量恒定。由FICK第二定律,可得氯离子在混凝土内随时间和空间分布的表达式为:

$$C_{x,t} = C_0 + (C_s - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x - \Delta x}{2\sqrt{D_{app}t}} \right) \right] \quad (1)$$

式中: $C_{x,t}$ 为暴露时间 $t$ 混凝土内深度为 $x$ 处的氯离子含量,%; $C_s$ 为混凝土表面氯离子含量,%; $C_0$ 为混凝土中的初始氯离子含量,%; $t$ 为暴露时间,s; $x$ 为距离混凝土表面的深度,m; $D_{app}$ 为混凝土内的氯离子表观扩散系数, $m^2/s$ ; $\Delta x$ 为混凝土表层氯离子对流区深度,m; $\operatorname{erf}(z)$ 为高斯误差函数。

由式(1)可知,确定混凝土表层氯离子对流区深度 $\Delta x$ 和对应的氯离子峰值 $C_s$ 对混凝土结构耐久性寿命预测和评估具有重要意义。研究表明:干湿交替区的氯离子在距离混凝土表面某深度处通常会存在一个局部的峰值,该峰值出现的位置可视为氯离子对流区深度(简称为对流区深度)。已有 $\Delta x$ 的研究成果主要基于实际测量,并将测试结果带入式(1)中进行拟合求解,但该方法不适宜于新建或混凝土表层氯离子含量未达到稳定的情况。由式

(1)还可知,若假设混凝土氯离子表观扩散系数、混凝土内初始氯离子含量和混凝土表层氯离子含量均为常数,则可通过测定混凝土内部某深度  $x$  处不同时间的氯离子含量,可间接求解对流区深度  $\Delta x$ ,其计算式为:

$$\frac{C_{x,t_1} - C_{x,t_2}}{C_s - C_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x - \Delta x}{2\sqrt{D_{app}t_2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x - \Delta x}{2\sqrt{D_{app}t_1}}\right) \quad (2)$$

该方法存在耗时长等且要求测量精度高,并且无法直接根据混凝土实体特性和其环境提前预估氯离子对流区深度  $\Delta x$ 。该方法虽为求解  $\Delta x$  增添了途径,但无法克服必须进行长期现场试验等弊端。目前,针对准确确定混凝土表层氯离子对流区深度的模型鲜见<sup>[14]</sup>。有研究基于水分影响深度模型和混凝土表层,对流区氯离子线性变化作出假设,构建出混凝土表层氯离子对流区深度模型<sup>[15-16]</sup>。所构建的氯盐对流区深度模型,如图1所示。

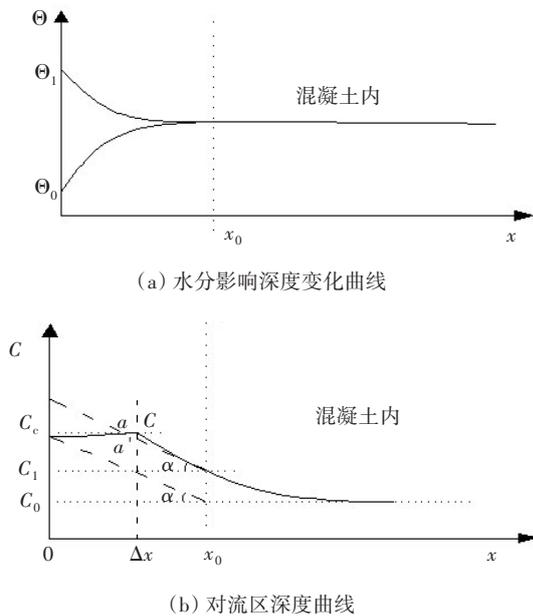


图1 混凝土内氯离子对流区深度模型

Fig. 1 Model of chloride ion convective depth in concrete

假设在混凝土水分影响深度  $x_0$  范围内氯离子变化规律为线性,外界氯盐环境中的氯离子等效含量为常数  $C_e$ ,氯离子对流区深度之内的混凝土氯离子变化规律符合 FICK 扩散定律,对应于  $x_0$  处和混凝土氯离子对流区深度  $\Delta x$  处的氯离子含量分别为  $C_1$  与  $C_s$ 。从图1可知,若将氯盐侵蚀曲线亦视为线性变化(图1(b)中的斜虚线),则两者间的函数关系可表

示为式(3)。简化处理可得到相应的氯离子对流区影响深度  $\Delta x$ ,其表达式为式(4)。

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C_e - C_0}{x_0} = \frac{C_s - C_1}{x_0 - \Delta x} \quad (3)$$

$$\Delta x = \left(1 - \frac{C_s - C_1}{C_e - C_0}\right)x_0 \quad (4)$$

式(4)即为提出的混凝土表层氯离子对流区深度模型。该模型中的环境氯离子含量  $C_e$ 、水分影响深度  $x_0$  范围内  $C_1$  与混凝土内初始氯离子含量  $C_0$  均可直接测定,相应的混凝土表层氯离子含量  $C_s$  在准稳态下亦可求得。若根据水分影响深度模型求解特定混凝土实体和相应环境下的  $x_0$  值,则可简便地计算任意工况下混凝土氯盐对流区深度  $\Delta x$ 。由式(4)可知,混凝土氯盐对流区深度  $\Delta x$  并不是定值,是混凝土内水分影响深度的函数,纠正了将其视为定值的片面认识。

采用有限差分法模拟混凝土内水分影响深度。若干湿交替下混凝土内水分传输流量采用表达式(5),则表征水分传输总效果的扩散系数由饱和度和边界条件共同决定,即采用式(6)进行计算。自然环境混凝土内部微环境湿度传导是一个非稳态的过程,因扩散系数难以直接测定,多基于混凝土吸水率与扩散系数间的显式关系间接获得,其表达式为式(7)。干燥过程中,混凝土内水分扩散系数采用欧洲规范 CEB-FIP Model Code 1990 标准推荐的 S 曲线来描述扩散系数<sup>[17]</sup>。模拟计算中,假设混凝土内初始饱和度的分布可表示为一维空间坐标  $x$  的函数,其表达式为式(9)。

$$j_w = -\rho_l \phi D_\theta \nabla \theta \quad (5)$$

$$D_\theta = \begin{cases} D_{d,\theta} = D_d^s \left[ \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1 - \theta}{1 - \theta_c}\right)^N} \right], & \text{干燥} \\ D_{w,\theta} = D_w^0 \exp(n\theta) & \text{, 湿润} \end{cases} \quad (6)$$

$$\left(\frac{S_0}{\phi}\right)^2 = D_w^0 \left( \exp(n) \left( \frac{2}{n} - \frac{1}{n^2} \right) - \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n^2} \right) \right) \quad (7)$$

$$\phi = \frac{\rho_c(m_w - m_d)}{\rho_w m_d} \times 100\% \quad (8)$$

$$\theta_{x,0} = \theta_{ini}(x) \quad (9)$$

式中: $D_w^0$ 为混凝土完全干燥时的水分扩散系数, $m^2/s$ ;  $D_{w,\theta}$ 为水分在混凝土饱和度为  $\theta$  条件下的扩散系

数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\theta$  为混凝土的孔隙饱和度, 取值  $0 \sim 1$ ;  $\theta_{x,0}$  为混凝土内  $x$  处初始时刻的孔隙饱和度;  $D_d^s$  为混凝土完全饱和时的水分扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $t$  为混凝土内初始水分扩散开始时间,  $\text{s}$ ;  $S_0$  为完全干状态的混凝土吸水率,  $\text{m}/\text{s}^{1/2}$ ;  $\phi$  为混凝土的毛细孔隙率, %;  $m_w$  为混凝土完全饱水时的重量,  $\text{kg}$ ;  $m_d$  为混凝土完全干燥时的重量,  $\text{kg}$ ;  $\rho_w$  为水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_c$  为混凝土完全干燥时的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\alpha_0, \theta_c$  和  $N$  为回归系数(取值可参考 CEB—FIP Model Code 推荐值);  $n$  为回归系数, 一般取  $6 \sim 8$ 。

## 1.2 混凝土表层氯离子含量随高程和距海水平距离变化规律

已有研究表明: 海洋氯盐环境对混凝土结构侵蚀的影响主要与距海面垂直高度和距海岸距离有关。当距海边距离超过定值后, 大气中所含氯盐主要与其距海岸距离有关, 而与垂直高度关系不大。若假设距海岸的混凝土结构表层氯离子含量主要受大气中氯盐含量影响, 则其应为距离  $l$  的函数, 其表达式为

$$C_s = f(l) \quad (10)$$

海边或海内混凝土结构因所处环境, 可按垂直高度划分为大气区、水下区、浪溅区和潮差区, 这些差异使得混凝土结构表面氯离子含量随高度分布呈现出特定规律。氯离子侵入水下区混凝土主要依靠扩散作用, 故可将  $C_s$  视为海水中氯离子含量值  $C$  的函数。浪溅区和潮差区主要依靠表面吸附作用和深层扩散作用, 其特征主要表现为  $C_s$  及其混凝土氯盐对流区深度  $\Delta x$  值与混凝土内饱和度、海水浸润时间比例、环境氯离子含量  $C_e$  等因素均有关。文献 [18] 研究表明: 已有混凝土内饱和度和水浸润时间比例是相互关联的函数, 一定的干湿浸润时间比例与相应的混凝土饱和度相对应。然而, 干湿浸润时间比例亦与周期性变化的海水潮汐相关, 在垂直距离上混凝土特定区域的周期性潮差变化必然是高度的函数, 故可将混凝土内饱和度、海水浸润时间比例、环境氯离子含量  $C_e$  三因素对  $C_s$  的影响均视作垂直高度  $h$  的函数, 其表达式为式(11)。因大气区主要通过吸收大气中的氯离子, 所以  $C_s$  应与距海面垂直距离有关, 其表达式为

$$C_s = g(h) \quad (11)$$

由式(4)和式(11)可知, 外界氯盐环境中的氯

离子等效含量  $C_e$  亦为距海高度的函数, 其表达式为

$$C_e = \begin{cases} C & , \text{水下区} \\ C_0 + (g(h) - C_1) \frac{x_0}{x_0 - \Delta x} & , \text{浪溅区/潮差区/大气区} \end{cases} \quad (12)$$

## 1.3 混凝土表层氯离子含量时变规律分析

从现有针对混凝土中氯离子侵蚀研究中可知, 主要假设混凝土表面氯离子含量为恒定值。然而, 检测结果表明: 实际氯盐环境中, 混凝土表面氯离子含量是随时间逐渐累积并趋于稳定的过程。目前, 描述表面氯离子含量时变性的模型主要有线性、多项式、平方根型、幂函数型、对数型及指数型等<sup>[19-21]</sup>函数形式。但这些模型差别较大, 其适用性还有待进一步验证, 许多学者采用 FICK 第二定律恒定边界条件的解析解对氯离子变化曲线进行拟合, 得到表面氯离子含量, 再对其进行时变性研究, 这在逻辑上存在自相矛盾。在不同影响因素方面, 许多学者认为表面氯离子随水灰比的增加而增大, 氯离子含量表达式为式(13)。但部分研究指出因皮肤效应的影响, 高水灰比的混凝土的表面氯离子含量较低。针对环境、材料等因素对混凝土表面氯离子含量累积规律影响的研究较少<sup>[22]</sup>。

$$C_s = A(W/C) + \varepsilon \quad (13)$$

式中:  $A$  和  $\varepsilon$  分别为拟合回归系数;  $W/C$  为水灰比。

本研究拟采用修正形式的指数函数模型来模拟环境和自然现场环境中混凝土表面氯离子含量随时间变化规律, 其表达式为:

$$C_{s(t)} = C_0 + C_{\max}(1 - e^{-rt}) \quad (14)$$

式中:  $C_{s(t)}$  为  $t$  时刻相应的混凝土表面氯离子含量, %;  $C_{\max}$  为稳态下混凝土表面氯离子含量, %;  $r$  为拟合系数;  $C_0$  为混凝土初始氯离子含量, %。

## 2 试验

### 2.1 试验原料与混凝土配比

所用主要原料为 P·O 42.5 级硅酸盐水泥, 聚羧酸系列高效减水剂, I 级粉煤灰, S95 级矿粉, 河砂, 连续级配粒径  $5 \sim 20 \text{ mm}$  石灰岩碎石, 自来水。浇筑试件尺寸为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  和  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  试件。所用的混凝土配合比, 见表 1。

表1 混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of concrete kg

混凝土等级	水泥	矿粉	粉煤灰	砂	石	水	减水剂
C20	220	65	60	780	1 030	176	3.9
C50	375	85	35	720	1 085	152	5.0

2.2 试验过程

试验将混凝土试件保留一个侧面,其余面采用环氧树脂密封。试样先置于温度分别为40、50、60℃的模拟环境72 h,分三个阶段进行氯盐侵蚀试验。其中,温度为40℃时侵蚀30 h;温度为50℃时侵蚀30 h;温度为60℃时侵蚀12 h,且在40℃下喷水50 min,其余阶段均为干燥过程。试验采用氯化钠溶液的氯化钠质量分数为5%,循环风速为3 m/s。根据现场工况,采用取芯机器,对不同部位的混凝土结构进行取样并编号;再采用丹麦生产的PF1100型剖面磨削机,以1 mm为单位进行取粉制样,所取粉末磨细至能通过75 μm方孔筛子;最后,按照《水运工程混凝土试验规程》(JTJ 270—1998)<sup>[23]</sup>的规定,测量总氯离子和水溶性氯离子含量。

3 分析与讨论

3.1 混凝土表层氯离子对流区深度研究

为计算混凝土表层氯离子对流区深度,须先求出水分影响深度。采用试验与模拟计算结合方式,验证模拟结果正确性。模拟试验相应的混凝土内初始饱和度约为0.8,环境湿度换算成混凝土表层的饱和度约为0.4,图2为相应的模拟环境中混凝土内饱和度分布曲线。混凝土内初始氯离子含量约为0.016%,实测混凝土密度约为2.4 g/cm<sup>3</sup>。图3为模拟环境中8个月混凝土试件内总氯离子含量分布曲线。

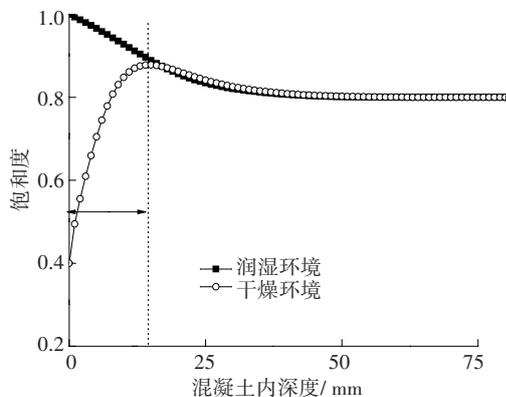


图2 模拟环境中混凝土内饱和度分布曲线

Fig. 2 Saturation distribution curve of concrete in simulated environment

从图2可以看出,在润湿过程和干燥过程中,混凝土内饱和度在表层 $x_0$ 深度范围内发生变化,在一定深度内,混凝土内水分饱和度稳定不变。对于混凝土初始水分饱和度稳定的试样,在模拟环境下相应的水分影响深度 $x_0$ 约为14 mm。

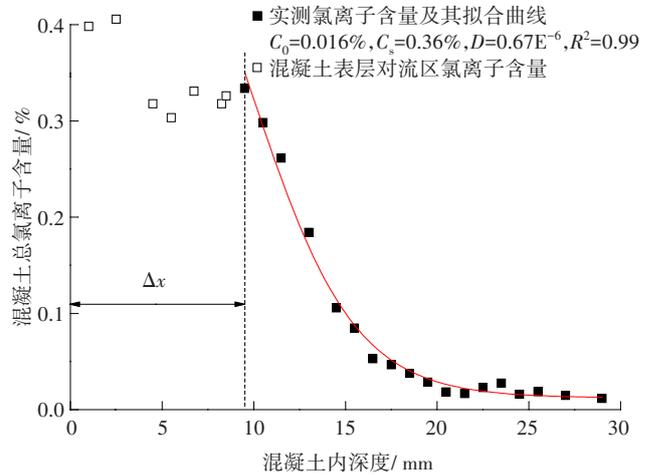


图3 模拟环境中混凝土试样内总氯离子含量分布曲线

Fig. 3 Chloride ion content curve of concrete in simulation environment

从图3可以看出,若基于混凝土某一深度外为混凝土表层对流区和该深度外氯离子扩散仍按FICK第二定律的假设,则实测数据值与理论拟合曲线间具有较佳的相关性;基于FICK第二定律,所求混凝土表层氯离子对流区深度 $\Delta x$ 值约为10 mm。尽管采用FICK第二定律,可确定相应环境条件下混凝土氯离子流区深度 $\Delta x$ 值大小,但该方法存在所用数据必须基于实测结果、试验耗时长和无法预测新建混凝土构件氯盐侵蚀情况等弊端。为克服其不足,本研究提出了混凝土表层氯离子对流区深度模型,基于式(4),确定混凝土表层氯离子对流区深度 $\Delta x$ 值约为11 mm;两数值间的差异是所构筑模型将对流区深度范围内氯离子变化假设为线性变化造成的,如图1所示。线性变化假设降低了实际混凝土表层氯离子含量,对流深度值有所增加。对比传统求解方法和构筑的氯离子对流区深度模型可知,两数据值基本一致,表明:所构筑模型是合理的。

以氯盐环境中的某栈桥潮差区为例,该栈桥处海域的潮汐性质属于不正规半日混合潮类型,在一个太阳日内,潮汐两涨两落,昼夜时长现象显著,该地实测海水盐度约为2.9%(基于保守考虑,将其视为氯盐浓度值);全年潮差浸润时间比约为0.776。

模拟试验计算结果表明:混凝土内水分影响深度约为6 mm。其混凝土内氯离子含量的分布曲线如图4所示。

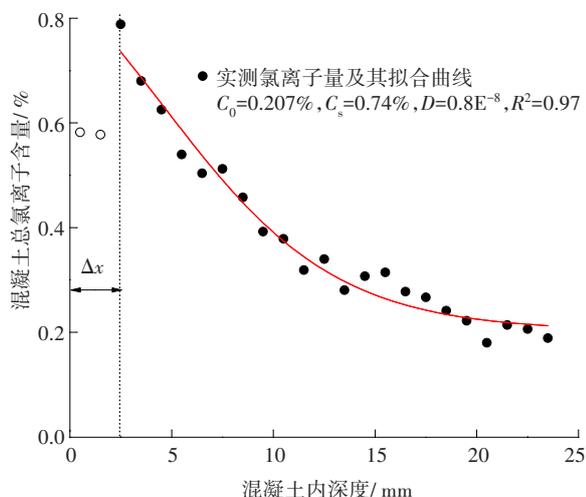


图4 某栈桥混凝土内氯离子含量的分布曲线

Fig. 4 Chloride ion content curve of concrete in a bridge

从图4可以看出,现场海港潮差区混凝土内氯离子含量的分布在某一深度内可采用FICK第二定律进行描述,且实测数据与模型模拟曲线吻合较好。而混凝土表层内氯离子含量分布则基本维持不变。表明:现场混凝土内某深度范围采用FICK第二定律进行描述是合理的,而相应的表层范围即为氯离子对流区深度。从图4还可以看出,氯离子对流区深度约为2.5 mm,而基于式(4),可求其值约为3.5 mm;表明:用本模型于求解现场混凝土中氯离子对流区深度是可行的。

基于文献[18]润湿时间比算法和当地不同高程混凝土润湿时间比的数据,所计算全年不同高程对应的海潮润湿时间比,见表2。图5为相应的润湿时间比随高度变化规律曲线。

表2 现场环境中不同高程混凝土润湿时间比

Table 2 Wetting time ratio of concrete at different altitudes for the in-situ environment

高程/m	月份												均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1.1	0.728	0.783	0.796	0.705	0.761	0.826	0.751	0.777	0.716	0.837	0.836	0.791	0.776
1.6	0.315	0.316	0.316	0.369	0.337	0.307	0.360	0.348	0.419	0.413	0.414	0.434	0.362
2.1	0.103	0.083	0.096	0.099	0.118	0.107	0.108	0.165	0.14	0.13	0.129	0.106	0.115
2.6	0.016												0.001

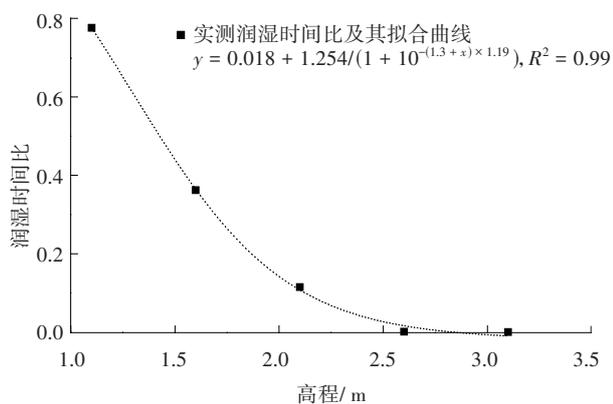


图5 润湿时间比随高度变化规律曲线

Fig. 5 Wetting time ratio-altitude curve

从表2和图5可以看出,混凝土结构全年润湿时间比随距海面高程增加而降低,并最终在一定高程后趋于零;对比表2中不同时间的润湿时间比可

知,不同月份的润湿时间比亦存在差异,这是海潮的自身特性造成的。从图5还可以看出,理论计算值与采用Sigmoidal模型中的DoseResp函数曲计算的结果吻合较好,表明:对于一定高程内,润湿时间比可采用该函数予以表征,这种方法为获取不同高程混凝土结构海潮润湿时间比提供了途径。

### 3.2 混凝土表层氯离子含量随高程和距海水平距离变化规律

为验证本研究提出的混凝土表层氯离子含量随垂直高度的变化规律。测定某地现场海港混凝土表层氯离子含量在垂直方向的变化值。混凝土内氯离子含量随高度在垂直方向的变化规律如图6所示。图6中,空心符号为混凝土对流区氯离子含量。混凝土表层氯离子含量和扩散系数随高度的

变化规律如图7所示。混凝土表层氯离子最大含量随距海距离的变化规律如图8所示。采用现场试验所测量的最近的验潮站(闸坡)数据进行标高换算,模拟曲线采用FICK第二定律进行模拟,所有模拟曲线的参数根据上述原理和实测曲线中的数据进行取值。

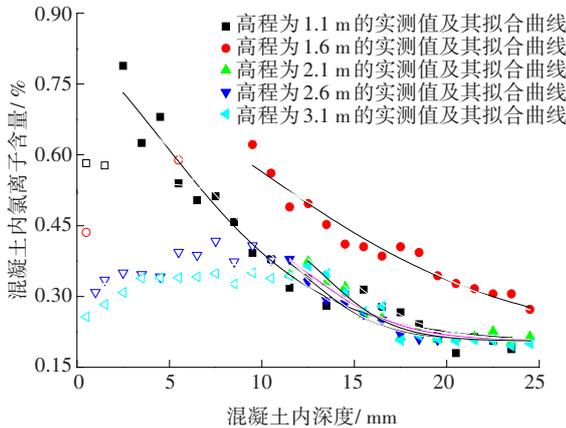


图6 混凝土内氯离子含量随高度变化规律

Fig. 6 Chloride ion content of concrete at different altitudes

从图6可以看出,现场海港混凝土内氯离子含量随垂直高度发生显著的变化。当混凝土接近海平面的潮差或浅水区域(1.1 m)时,混凝土表层约2.5 mm区域内氯离子含量基本维持恒定,且在混凝土表层内某点(约2.5 mm处),氯离子含量达到最大值,该极值以内混凝土氯离子含量可采用FICK扩散定律予以描述。当混凝土处于潮差区或浪溅区(1.6 m)时,混凝土内氯离子含量分布规律与本研究提出的混凝土表层氯离子含量随垂直高度变化规律基本类似,但混凝土表层氯离子对流区增加,且混凝土内氯离子含量增大。随干燥过程持续进行,所含孔隙水最终将以蒸汽形式向外界迁移。而氯盐溶液将在浓缩、滞后和结晶等效应作用下,使得混凝土内某深度区域内的氯盐含量增加,进而使得氯离子在混凝土内发生双向扩散。湿润开始时,表层氯离子相对孔隙液的含量因前期孔隙液的蒸发而高于外界溶液,向表面扩散。干湿循环周而复始,使得混凝土内某深度处氯离子含量达到准平衡态,且出现与干湿时间比相匹配的氯离子对流区深度和含量极值。由于混凝土孔隙阻断效应和氯盐扩散的滞后效应,该情况仅在混凝土表层范围出现,而深处的孔隙饱和度鲜有变化,所以可采用

FICK第二定律表征其规律。当混凝土处于大气区(垂直高度分别为2.1、2.6和3.1 m)时,混凝土表层较大区域内氯离子含量基本恒定。而从除混凝土表层该区域外至混凝土较深处氯离子扩散符合FICK第二定律。这是由大气区混凝土内氯离子主要来源于含氯盐量较低海雾、雨水和空气,相应的浓度梯度较低,扩散驱动力较小造成的。若基于式(12)和2.1 m处混凝土内氯离子含量,则可计算出大气区的环境等效氯离子含量值约为0.4%。为更好地探讨高度对混凝土内氯盐含量的影响,本研究对其表层氯离子含量和扩散系数随高度变化规律进行了分析,如图7所示。

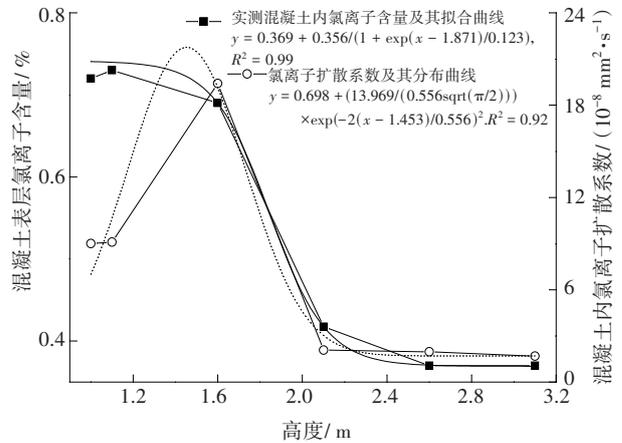


图7 混凝土表层氯离子含量和扩散系数随高度变化曲线

Fig. 7 Chloride ion content and diffusion coefficient of concrete at different altitudes

从图7可以看出,混凝土表层氯离子含量和扩散系数随高度增加而发生显著变化,但两者表现规律略有差别。混凝土表层氯离子含量随高度增加先略有增大,维持一定值后,迅速降低。整体变化规律可采用S曲线予以表征,其表达式为式(15)。而相应的混凝土氯离子扩散系数随高度的变化规律为先增加后降低的趋势,其曲线变化规律表现为良好的高斯分布,其计算式为:

$$y = a + b / \{1 + \exp[(x - x_0) / c]\} \quad (15)$$

$$y = y_0 + \frac{a}{b \sqrt{0.5\pi}} \exp\left[-2\left(\frac{x - x_0}{b}\right)^2\right] \quad (16)$$

混凝土表层氯离子最大含量随距海边距离的变化规律,如图8所示。

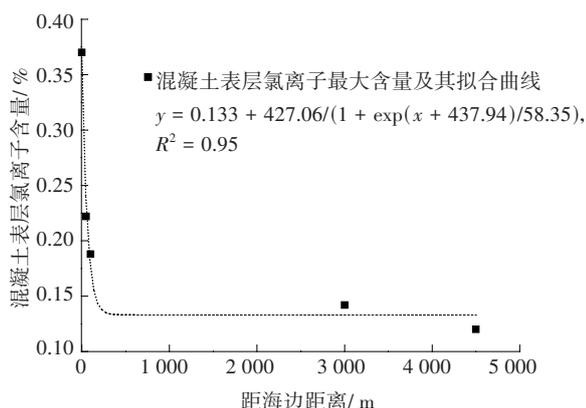


图8 混凝土表层氯离子最大含量随距海边距离曲线

Fig. 8 Effect of the distance from the sea on the maximum chloride ion content on the concrete surface

从图8可以看出,混凝土表层氯离子最大含量随海距离增加迅速降低,且在一定距离后表现为稳定状态,整体变化亦可采用式(15)来描述。这是因为混凝土表层氯离子是空气中氯盐不断吸附和累积的结果。距海越近的海风中所含氯离子量越大,空气中的氯盐含量随距离增加而逐渐减少,且一定距离后空气中所提供的氯离子极为有限,混凝土结构表层富集氯离子主要由海雾和降水提供。

### 3.3 混凝土表层氯离子含量随时间的变规律

为研究模拟环境与现场环境中混凝土表层氯离子随时间的变化规律是否相同,以模拟环境中C20和C50混凝土为例,探讨其随时间变化的规律,结果如图9所示。

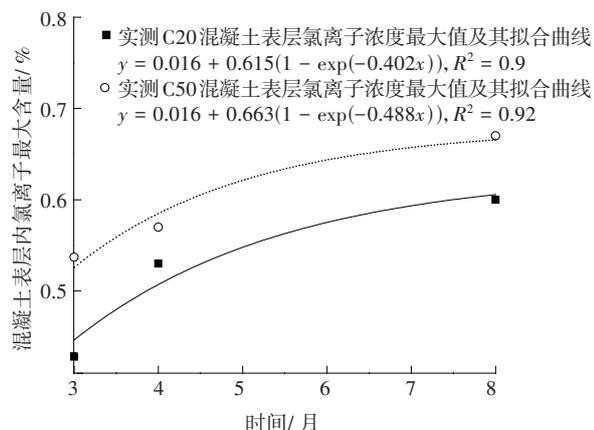


图9 混凝土表层氯离子最大含量时变规律曲线

Fig. 9 The evolution of the maximum chloride ion content on the concrete surface with the change of time

从图9可以看出,混凝土表层氯离子最大含量

随时间增加而增大,但其值最终趋于稳定;混凝土强度等级越高,短期内相应的混凝土表层氯离子最大含量越大,但随时间延长两者逐渐趋于一致;实测数据结果与理论拟合曲线吻合较好,表明:采用修正的指数函数模型(式(14))可描述模拟环境中混凝土表面氯离子含量随时间的变化规律。模拟环境中,混凝土表层氯离子含量是随时间不断积累的过程,且该过程最终趋于平衡状态。不同强度等级混凝土表层最大氯离子含量不同,可能是因为微观结构和孔隙含量等不同(即混凝土强度等级越高),其孔隙率越低而相应的微观孔隙含量比却较大,相应的毛细管作用更加剧烈,故其早期氯离子含量较高;低强度等级的混凝土孔隙较多,其所能容纳、浓缩和富集的氯盐亦较多,混凝土表层氯盐含量亦会随时间延长而趋于稳定。

## 4 结论

1) 基于混凝土水分影响深度及其范围内氯离子线性变化的假设,建立了混凝土表层氯离子对流区深度模型,并利用试验验证了模型的合理性。混凝土氯盐对流区深度并不是定值,它是混凝土内水分影响深度的函数,从而纠正了将其视为定值的片面认识。

2) 混凝土表层氯离子含量与高度和距海远近间存在良好的相关性。混凝土氯离子扩散系数随高度的变化规律表现为先增加后降低,曲线呈高斯分布;混凝土表层氯离子含量与高度和距海远近间符合S曲线。

3) 混凝土表层氯离子最大含量随时间增加而增大,但其值最终趋于稳定。混凝土的强度等级越高,短期混凝土表层氯离子的最大含量越大,但随时间延长两者逐渐趋于一致;实测数据结果与理论拟合曲线吻合较好,采用修正指数函数模型可描述模拟环境中混凝土表面氯离子含量随时间的变化规律。

### 参考文献(References):

- [1] YU Z W, CHEN Y, LIU P, et al. Accelerated simulation of chloride ingress into concrete under drying-wetting alternation condition chloride environment [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 205-213.

- [2] BALESTRA C E T, REICHERT T A, PANSERA W A, et al. Chloride profile modeling contemplating the convection zone based on concrete structures present for more than 40 years in different marine aggressive zones [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 198: 345-358.
- [3] DASAR A, PATAH D, HAMADA H, et al. Life performance of 40-year-old RC beams with different concrete covers and bar diameters in natural corrosion environments[J]. *Structures*, 2022, 46: 2031-2046.
- [4] 查旭东, 钟海阔, 吕茂丰, 等. 旧水泥混凝土路面共振破碎振动影响范围研究[J]. *交通科学与工程*, 2023, 39(4):1-8.  
ZHA Xudong, ZHONG Haikuo, LYU Maofeng, et al. Influence range test of vibration for resonant rubbleization in existing cement concrete pavement [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2023, 39(4): 1-8.
- [5] DUAN A, DAI J G, JIN W L. Probabilistic approach for durability design of concrete structures in marine environments [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(2): A4014007.
- [6] YANG Y M, PENG J X, CAI C S, et al. Probabilistic analysis of corrosion initiation in existing reinforced concrete structures with imprecise random field [J]. *Structures*, 2023(52): 877-888.
- [7] WANG T, LI C H, ZHENG J J, et al. Consideration of coupling of crack development and corrosion in assessing the reliability of reinforced concrete beams subjected to bending[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2023, 233: 109095.
- [8] DURACRETE P. General guidelines for durability design and redesign[J]. The European Union-Brite Eu Ram III, Project No BE95-1347: Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures, 2000, 15(6): 57-63.
- [9] TROCONIS DE RINCÓN O, CASTRO P, MORENO E I, et al. Chloride profiles in two marine structures-meaning and some predictions [J]. *Building and Environment*, 2004, 39(9): 1065-1070.
- [10] 薛文. 基于全寿命理论的海工混凝土耐久性优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.  
XUE Wen. Life cycle theory-based durability optimized design of marine concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [11] 范宏, 王鹏刚, 赵铁军. 长期暴露混凝土结构中的氯离子侵入研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(1):88-94.  
FAN Hong, WANG Penggang, ZHAO Tiejun. Research on chloride penetration for RC structures after long-term exposure [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(1): 88-94.
- [12] LI K F, LI C Q, CHEN Z Y. Influential depth of moisture transport in concrete subject to drying-wetting cycles [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(10): 693-698.
- [13] CASTRO P, VÉLEVA L, BALANCÁN M. Corrosion of reinforced concrete in a tropical marine environment and in accelerated tests [J]. *Construction and Building Materials*, 1997, 11(2): 75-81.
- [14] 李荣涛. 对流效应对氯离子侵蚀混凝土过程的影响[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(12): 5066-5070.  
LI Rongtao. Effect of convection on chloride penetration in concrete [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(12): 5066-5070.
- [15] 刘鹏. 人工模拟和自然氯盐环境下混凝土氯盐侵蚀相似性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.  
LIU Peng. Research on similarity of the chloride ingress in concrete under natural and artificial simulation environment [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [16] LIU P, YU Z W, LU Z H, et al. Predictive convection zone depth of chloride in concrete under chloride environment [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 72: 257-267.
- [17] Comité Euro-International Du Béton. CEB-FIP Model Code 1990: Design Code[S]. London: Thomas Telford Publishing, 1993.
- [18] 姚昌建. 沿海码头混凝土设施受氯离子侵蚀的规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.  
YAO Changjian. Penetration laws of chloride ions in concrete infrastructures at coastal ports [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [19] STAMBAUGH N D, BERGMAN T L, SRUBAR W V. Numerical service-life modeling of chloride-induced corrosion in recycled-aggregate concrete [J].

- Time-dependent reliability assessment of aging structures considering stochastic resistance degradation process [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 217: 108105. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108105.
- [14] GHANEM R G, SPANOS P D. Stochastic finite elements: spectral approach [M]. New York, NY: Springer New York, 1991. DOI: 10.1007/978-1-4612-3094-6.
- [15] YU Zhiwu, CHEN Ying, LIU Peng, et al. Accelerated simulation of chloride ingress into concrete under drying-wetting alternation condition chloride environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93: 205-213. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.090.
- [16] WANG Hailong, DAI Jianguo, SUN Xiaoyan, et al. Time-dependent and stress-dependent chloride diffusivity of concrete subjected to sustained compressive loading [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28 (8) : 04016059. DOI: 10.1061/(asce) mt. 1943-5533.0001578.
- [17] LU Zhaohui, ZHAO Yangang, YU Zhiwu, et al. Probabilistic evaluation of initiation time in RC bridge beams with load-induced cracks exposed to de-icing salts [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(3): 365-372. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.12.003.
- [18] SHAFEI Behrouz, ALIPOUR Alice. Application of large-scale non-Gaussian stochastic fields for the study of corrosion-induced structural deterioration [J]. *Engineering Structures*, 2015, 88: 262-276. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.12.024.
- [19] GUO Tong, SAUSE R, FRANGOPOL D M, et al. Time-dependent reliability of PSC box-girder bridge considering creep, shrinkage, and corrosion [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 16 (1) : 29-43. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000135.

(责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:李岳林)

(上接第9页)

- Construction and Building Materials*, 2018, 161: 236-245.
- [20] 陈昌, 杨绿峰, 余波. 海洋潮汐区混凝土表面氯离子浓度的时变规律及多因素模型 [J]. *材料导报*, 2019, 33 (增刊2): 321-326.
- CHEN Chang, YANG Lyufeng, YU Bo. Multi-factor model and time-varying law for surface chloride concentration of concrete in marine tidal zone [J]. *Materials Reports*, 2019, 33(sup2): 321-326.
- [21] BAO J W, WEI J N, ZHANG P, et al. Experimental and theoretical investigation of chloride ingress into concrete exposed to real marine environment [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 130: 104511.
- [22] 张荣亮, 杨建宇, 易伟建. 沿海大气环境混凝土表面氯离子浓度与氯离子扩散系数相关性研究 [J]. *公路*, 2018, 63(7): 304-308.
- ZHANG Rongliang, YANG Jianyu, YI Weijian. Correlation between chloride ion concentration and chloride ion diffusion coefficient on concrete surface in coastal atmospheric environment [J]. *Highway*, 2018, 63 (7): 304-308.
- [23] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程混凝土试验检测技术规范: JTS/T 236-2019 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- CCCC Tianjin Harbor Engineering Research Institute Co., Ltd.. Testing specification for concrete testing of port and waterway engineering: JTS/T 236—2019. [S]. Beijing, China Communications Press, 2019.

(责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:李岳林)