

裂缝非贯通条件下混凝土结构中氯离子扩散解析

李镜培^{1,2}, 李亮^{1,2}, 李林^{1,2}, 谢峰^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 考虑混凝土裂缝的非贯通条件, 根据裂缝深度将带裂缝混凝土结构分为裂缝区和无裂缝区. 依据 Fick 第二定律, 建立氯离子在带裂缝混凝土结构中的扩散方程, 结合初始条件和边界条件, 采用 Laplace 变换法得到带裂缝混凝土结构中氯离子扩散方程的解析解, 并分析裂缝宽度和深度对氯离子分布规律及钢筋混凝土结构耐久寿命影响. 结果表明, 裂缝的深度越小、宽度越大, 则裂缝非贯通条件下的氯离子浓度与裂缝贯通条件下的氯离子浓度差异越大. 随着裂缝深度与保护层厚度之比 d_{cr}/d_c 增大, 钢筋混凝土结构耐久寿命呈现先减小后增大的变化趋势; 当 $d_{cr}/d_c=1.0$ 时, 结构耐久寿命取得最小值; 当 $d_{cr}/d_c>1.6$ 时, 结构耐久寿命可近似按裂缝贯通时的情况计算.

关键词: 氯离子扩散; 混凝土结构; 裂缝; 寿命预测

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Analysis of Chloride Ion Diffusion in Concrete Structure under Non-penetrating Crack Condition

LI Jingpei^{1,2}, LI Liang^{1,2}, LI Lin^{1,2}, XIE Feng^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the crack depth, concrete structure is divided into two parts, cracks zone and sound zone. Based on Fick's second law, diffusion equation of chloride ions in cracked concrete structure is established. Combined with the initial and boundary conditions, analytical solution of the diffusion equation of chloride ions in cracked concrete structure was derived by the Laplace transform method. Finally, the influence of crack width and depth on the distribution of chloride ions and the durability life of reinforced concrete structures was analyzed. The results show that the smaller the depth and the larger the width of the crack, the greater the difference between the chloride ion

concentration in the case of crack non-penetrating crack and the chloride ion concentration in the case of penetrating crack. With the increase of the ratio of crack depth to cover depth, the service life of reinforced concrete structure decreases first and then increases. When $d_{cr}/d_c=1.0$, the service life approaches to the minimum. When $d_{cr}/d_c>1.6$, the service life can be approximately calculated according to the condition of penetrating crack.

Key words: chlorine diffusion; concrete structure; crack; service life prediction

海洋环境中的钢筋混凝土结构长期遭受氯离子侵蚀作用, 其耐久性问题越来越得到人们的关注. 海洋环境中的氯离子通过扩散作用从混凝土的暴露表面向内部运输, 当钢筋表面的氯离子浓度达到临界浓度, 且水分及氧气条件满足时, 钢筋表面的钝化膜消失, 钢筋开始锈蚀^[1-2]. 在实际情况下, 海洋环境中服役的混凝土结构常常是带有裂缝的, 比如预制混凝土桩在制作、运输、打入和服役等过程中, 经受静荷载及波浪动荷载等的作用, 会形成不同形式的裂缝. 当管桩受劈裂作用时, 外表面混凝土出现 V 型特征的裂缝, 裂缝深度随裂缝宽度增大而增大, 当裂缝宽度达到一定阈值后, 才形成贯穿裂缝^[3]. 对于一般的混凝土结构, 在荷载作用下, 结构上会形成不同宽度、不同深度的裂缝. 裂缝为氯离子、水分和氧气提供了进入混凝土内部的快速通道, 对混凝土结构耐久性产生不利影响^[4]. 混凝土结构耐久性设计中, 如果不能正确评价裂缝的影响, 会对钢筋混凝土结构耐久寿命计算带来较大误差. 因此, 研究带裂缝钢筋混凝土结构中氯离子扩散行为及结构耐久寿命具有重要的科学意义.

目前, 针对带裂缝混凝土结构中的氯离子运输, 国内外已经做了大量研究. Djerbi 等^[5]对带裂缝的

不同类型混凝土进行了氯离子稳态扩散试验,结果表明,当裂缝宽度大于 $80\ \mu\text{m}$ 时,裂缝内的氯离子扩散系数与溶液中的扩散系数相等. Lim 等^[6]研究了单轴压缩条件下混凝土中氯离子的扩散行为,发现微裂缝面积对氯离子扩散系数存在影响. Marsavina 等^[7]对存在预置裂缝的混凝土试件进行了氯离子非稳态扩散试验,结果发现当裂缝深度增大时,氯离子的扩散深度增大. Mu 等^[8]研究了多条裂缝存在时混凝土中氯离子扩散行为,发现裂缝密度对于氯离子扩散同样存在影响. 由于裂缝问题本身的复杂性,目前学者大多基于单一参数分析裂缝对混凝土中氯离子运输的影响,不能完整地反映裂缝的影响,尤其对于裂缝深度的研究较少,这样对于非贯通裂缝的影响评价是不准确的,亟待进行相应的试验及理论研究.

针对带裂缝混凝土结构的寿命计算, Kwon 等^[9]、Lu 等^[10]、Shao 等^[11]进行了相应的研究,但这些研究都是在假定裂缝贯通的条件下进行的. 对于非贯通的裂缝,目前的理论研究还较少. 为此,本文以裂缝宽度和深度作为影响氯离子扩散的主要指标,建立氯离子在带裂缝混凝土中的扩散方程,通过 Laplace 变换法对其进行求解,分析裂缝宽度及深度对混凝土结构中的氯离子浓度分布及耐久寿命的影响.

1 氯离子在带裂缝混凝土中的扩散

1.1 扩散方程

带裂缝混凝土结构中的氯离子扩散为一个复杂的运输过程,为了简化问题,便于求解,特作出以下假设:

(1) 氯离子在裂缝附近的扩散为一维扩散,扩散系数为常数. 如图 1 所示,在裂缝的深度范围内,氯离子扩散系数为氯离子在裂缝与混凝土中的等效扩散系数 D_{eq} ;在裂缝的深度范围以外,氯离子扩散系数为氯离子在无裂缝混凝土中的扩散系数 D_0 .

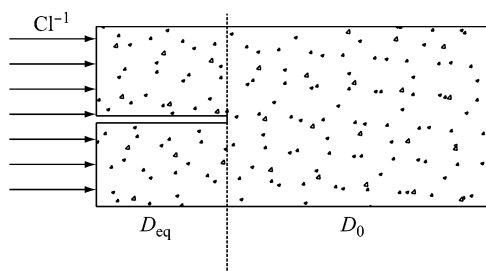


图 1 带裂缝混凝土中氯离子扩散示意

Fig.1 Chlorine diffusion in cracked concrete

(2) 裂缝延伸方向正对钢筋.

(3) 混凝土表面氯离子浓度呈现指数型变化^[12].

(4) 裂缝为单一裂缝,忽略裂缝之间的相互影响.

设裂缝的深度为 d_{cr} ,依据 Fick 第二扩散定律可得带裂缝混凝土结构中氯离子扩散方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial C_1}{\partial t} = D_{\text{eq}} \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} & (0 < x < d_{\text{cr}}) \\ \frac{\partial C_2}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} & (x > d_{\text{cr}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_1 为裂缝深度范围内的氯离子浓度; C_2 为裂缝深度范围以外的氯离子浓度; t 为扩散时间; x 为氯离子浓度计算深度. 方程(1)的初始条件为

$$\begin{cases} C_1 = 0 & (0 < x < d_{\text{cr}}) \\ C_2 = 0 & (x > d_{\text{cr}}) \end{cases} \quad (2)$$

方程(1)的边界条件为

$$\begin{cases} C_1 = C_s [1 - \exp(-rt)] & (x = 0) \\ C_1 = C_2, D_{\text{eq}} \frac{\partial C_1}{\partial x} = D_0 \frac{\partial C_2}{\partial x} & (x = d_{\text{cr}}) \\ C_2 = 0 & (x \rightarrow \infty) \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_s 为混凝土表面氯离子浓度的稳定值; r 为混凝土表面氯离子吸附系数.

1.2 方程的求解

方程(1)是二阶偏微分方程组,采用 Laplace 变换法对其进行求解.

对时间 t 进行 Laplace 变换,将偏微分方程转换成常微分方程. 方程(1)变为

$$\begin{cases} s\tilde{C}_1 = D_{\text{eq}} \frac{d^2 \tilde{C}_1}{dx^2} & (0 < x < d_{\text{cr}}) \\ s\tilde{C}_2 = D_0 \frac{d^2 \tilde{C}_2}{dx^2} & (x > d_{\text{cr}}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: \tilde{C}_1 为 C_1 的拉普拉斯变换式; \tilde{C}_2 为 C_2 的拉普拉斯变换式; s 为拉普拉斯变量.

对边界条件(3)同时进行 Laplace 变换,为

$$\begin{cases} \tilde{C}_1 = \frac{C_s r}{s(s+r)} & (x = 0) \\ \tilde{C}_1 = \tilde{C}_2, D_{\text{eq}} \frac{d\tilde{C}_1}{dx} = D_0 \frac{d\tilde{C}_2}{dx} & (x = d_{\text{cr}}) \\ \tilde{C}_2 = 0 & (x \rightarrow \infty) \end{cases} \quad (5)$$

方程(4)为二阶常微分方程,其通解为

$$\begin{cases} \tilde{C}_1 = A_1 \exp\left(\sqrt{\frac{s}{D_{\text{eq}}}} x\right) + B_1 \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{D_{\text{eq}}}} x\right) \\ \tilde{C}_2 = A_2 \exp\left(\sqrt{\frac{s}{D_0}} x\right) + B_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{D_0}} x\right) \end{cases} \quad (6)$$

式中 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 可由边界条件(5)确定,将式(5)

代入式(6)可得

$$A_1 + B_1 = \frac{C_s r}{s(s+r)} \quad (7)$$

$$A_2 = 0 \quad (8)$$

$$B_1 = \frac{C_s r}{s(s+r) \left[1 - \frac{K-1}{K+1} \exp\left(-2\sqrt{\frac{s}{D_{eq}}} d_{cr}\right) \right]} \quad (9)$$

$$B_2 = \frac{2C_s r \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{s}{D_0}} d_{cr} - \sqrt{\frac{s}{D_{eq}}} d_{cr}\right)}{(K+1)s(s+r) \left[1 - \frac{K-1}{K+1} \exp\left(-2\sqrt{\frac{s}{D_{eq}}} d_{cr}\right) \right]} \quad (10)$$

其中 $K = \sqrt{\frac{D_0}{D_{eq}}}$.

将系数(7)、(8)、(9)、(10)代回式(6),可得方程(4)的解为

$$\tilde{C}_1 = \frac{C_s r \cdot \left[\exp\left(-\sqrt{\frac{s}{D_{eq}}} x\right) - \frac{K-1}{K+1} \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{D_{eq}}} (2d_{cr} - x)\right) \right]}{s(s+r) \left[1 - \frac{K-1}{K+1} \exp\left(-2\sqrt{\frac{s}{D_{eq}}} d_{cr}\right) \right]} \quad (11)$$

$$\tilde{C}_2 = \frac{2C_s r \cdot \exp\left[\left(\sqrt{\frac{s}{D_0}} - \sqrt{\frac{s}{D_{eq}}}\right) d_{cr} - \sqrt{\frac{s}{D_0}} x\right]}{(K+1)s(s+r) \left[1 - \frac{K-1}{K+1} \exp\left(-2\sqrt{\frac{s}{D_{eq}}} d_{cr}\right) \right]} \quad (12)$$

对上式(11)、(12)进行 Laplace 逆变换,令 $R = \frac{K-1}{K+1}$, $|R| < 1$,对 $\left[1 - R \exp\left(-2\sqrt{\frac{s}{D_{eq}}} d_{cr}\right) \right]^{-1}$ 进行级数展开,可得

$$\begin{aligned} \tilde{C}_1 = & \frac{C_s r}{s(s+r)} \left[\exp\left(-\sqrt{\frac{s}{D_{eq}}} x\right) - \frac{K-1}{K+1} \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{D_{eq}}} \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. (2d_{cr} - x)\right) \right] \cdot \left[\sum_{n=0}^{\infty} R^n \exp\left(-2n\sqrt{\frac{s}{D_{eq}}} d_{cr}\right) \right] = \\ & \frac{C_s r}{s(s+r)} \sum_{n=0}^{\infty} \left[R^n \exp\left(-\sqrt{s} \frac{x + 2nd_{cr}}{\sqrt{D_{eq}}}\right) - \right. \\ & \left. R^{n+1} \exp\left(-\sqrt{s} \frac{(2n+2)d_{cr} - x}{\sqrt{D_{eq}}}\right) \right] \quad (13) \end{aligned}$$

同理可得

$$\tilde{C}_2 = \frac{2C_s r}{(K+1)s(s+r)} \sum_{n=0}^{\infty} R^n \cdot \exp\left[-\sqrt{s} \left(\frac{(2n+1)d_{cr}}{\sqrt{D_{eq}}} + \frac{x - d_{cr}}{\sqrt{D_0}} \right) \right] \quad (14)$$

根据 Laplace 逆变换卷积公式及逆变换公式

$L^{-1} \left[\frac{1}{s} \exp(-k\sqrt{s}) \right] = \text{erfc}\left(\frac{k}{2\sqrt{t}}\right)$ 可得

$$C_1 = C_s r \cdot \int_0^t \exp[-r(t-\tau)] \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[R^n \text{erfc}\left(\frac{x + 2nd_{cr}}{2\sqrt{D_{eq}\tau}}\right) - R^{n+1} \text{erfc}\left(\frac{(2n+2)d_{cr} - x}{2\sqrt{D_{eq}\tau}}\right) \right] d\tau \quad (15)$$

$$C_2 = \frac{2C_s r}{K+1} \cdot \int_0^t \exp[-r(t-\tau)] \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[R^n \text{erfc}\left(\frac{(2n+1)d_{cr}}{2\sqrt{D_{eq}\tau}} + \frac{x - d_{cr}}{2\sqrt{D_0\tau}}\right) \right] d\tau \quad (16)$$

其中 erfc 为互补误差函数, $\text{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\eta^2} d\eta$.

1.3 带裂缝混凝土中氯离子扩散系数

氯离子在带裂缝混凝土中的扩散能力通常采用带裂缝混凝土的等效扩散系数 D_{eq} 来表示. 由于裂缝混凝土的非连续性与非均匀性,给理论解析工作造成了很多困难.

Park 等^[13]在热力学框架内建立了带裂缝混凝土中考虑多种作用的氯离子输运计算方法. Ye 等^[14]基于通量相等原理,建立了综合考虑裂缝不同参数的裂缝混凝土中的氯离子输运模型. 但这些模型都是以稳态扩散为基础,与实际的非稳态扩散过程存在一定差异,相关模型的适用性还需要进一步验证.

在试验及现场测试中,为了简化分析,裂缝宽度常常被作为主要的控制参数,学者们针对裂缝宽度对带裂缝混凝土中氯离子输运的影响进行了大量的研究. 很多学者^[9,15-16]发现裂缝宽度对于带裂缝混凝土中的氯离子运输影响很大,带裂缝混凝土中的等效氯离子扩散系数 D_{eq} 可以表示成无裂缝混凝土中的氯离子扩散系数 D_0 和裂缝宽度 w_{cr} 的函数,如式(17):

$$D_{eq} = f(w_{cr}) \cdot D_0 \quad (17)$$

式中: $f(w_{cr})$ 为表征裂缝宽度 w_{cr} 对氯离子扩散性能的影响的劣化效应函数, w_{cr} 为裂缝宽度.

Kwon 等^[9]对码头混凝土进行了现场测试,得到了存在早期裂缝的混凝土中氯离子等效扩散系数与裂缝宽度的关系式(18). 陆春华等^[15]对于受弯开裂混凝土进行了氯盐干湿循环试验,利用双重孔隙介质模型获得了裂缝宽度影响的经验式(19). 左国望等^[16]同样对不同裂缝宽度的开裂混凝土进行了氯盐干湿循环试验,得到了相应的式(20).

$$f(w_{cr}) = 31.61w_{cr}^2 + 4.73w_{cr} + 1 \quad (18)$$

$$f(w_{cr}) = 47.18w_{cr}^2 - 8.18w_{cr} + 1 \quad (19)$$

$$f(w_{cr}) = 7.84w_{cr}^3 - 16.54w_{cr}^2 + 16.26w_{cr} + 1 \quad (20)$$

从图2可以看出,式(18)和式(20)的取值比较接近,式(19)的取值略小于式(18)和式(20).由于带裂缝混凝土中的氯离子扩散是非稳态扩散,短时间内的试验结果可能会产生较大的误差,式(18)是对服役7年和11年的裂缝混凝土结构进行现场检测得到的结果,结果更加稳定.本文采用式(18)作为后续计算的等效氯离子扩散系数值.

根据已有试验数据,无裂缝混凝土中的氯离子扩散系数 D_0 可以表示成水灰比(w/c)的函数^[17]:

$$D_0 = 10^{-3.9(w/c)^2 + 7.2(w/c) - 14.0} \quad (21)$$

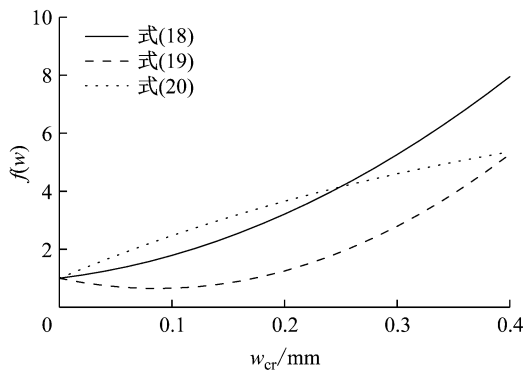


图2 裂缝宽度对等效扩散系数的影响

Fig.2 Effect of crack width on equivalent diffusion coefficient

2 模型验证

2.1 理论验证

对于裂缝非贯通条件下混凝土中氯离子的扩散计算,目前尚没有相应的理论解析,而无裂缝混凝土和裂缝贯穿混凝土中的氯离子扩散已有常用的基于Fick第二定律的解析解.为验证本文方法的正确性,采用本文计算得到的结果与该理论解析解进行对比.

氯离子在混凝土中的扩散符合Fick第二定律,扩散方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (22)$$

式中: C 为氯离子浓度; D 为氯离子扩散系数(无裂缝混凝土中氯离子扩散系数为 D_0 ,裂缝贯通条件下氯离子扩散系数为 D_{eq}).

对于初始条件为 $t=0, x>0$ 时, $C=0$;边界条件 $x=0, t>0$ 时, $C=C_s$,可以解得氯离子不同时间、不同位置的浓度分布为

$$C = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (23)$$

其中 erf 为误差函数, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\eta^2} d\eta$.

为了验证本文模型的正确性,取2种情况与式(23)进行对比.①无裂缝混凝土中氯离子扩散: $d_{cr}=0$;②裂缝贯通条件下的氯离子扩散, $w_{cr}=0.3$ mm, $d_{cr}=1 \times 10^5$ mm(d_{cr} 取一较大值,模拟裂缝贯通的情况).暴露时间为30年, $C_s=9.0$ kg·m⁻³, $w/c=0.3$, $r=1.0 \times 10^{-5}$ s⁻¹(r 取一较大值,加快混凝土表面氯离子吸附过程,模拟表面氯离子浓度为常数的情况).从图3可以看出,本文模型与式(23)在无裂缝和裂缝贯通条件下的吻合情况良好,验证了本文模型的正确性.

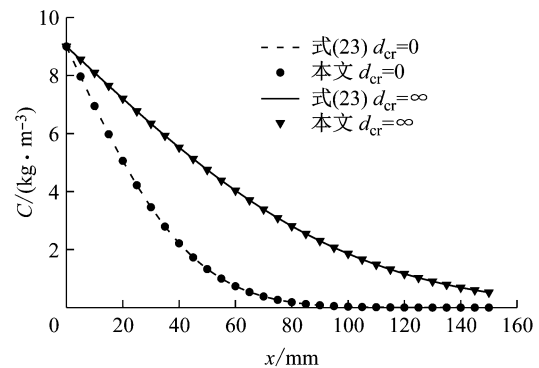


图3 本文模型与式(23)对比

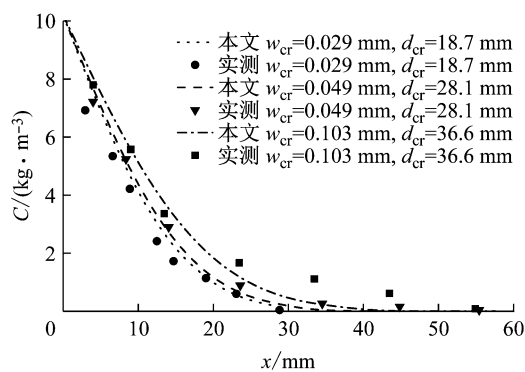
Fig.3 Comparison between formula (23) and the model in this paper

2.2 试验验证

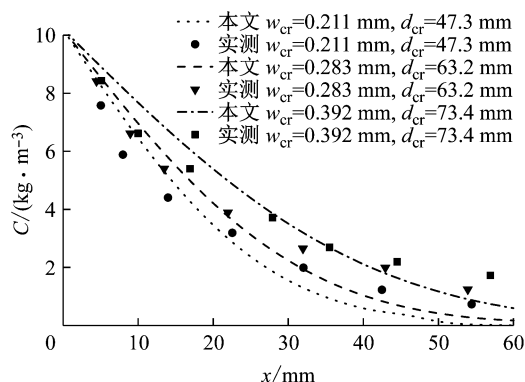
Sahmaran^[18]对砂浆梁进行弯曲加载以产生不同宽度和深度的裂缝,在氯盐溶液中暴露30 d后测量裂纹区的氯离子浓度分布.无裂缝砂浆中的氯离子扩散系数为 2.34×10^{-11} m²·s⁻¹,试验中所采用的氯离子浓度为氯离子占砂浆质量的分数,可按照砂浆密度 2000 kg·m⁻³进行转换.表面氯离子质量浓度为 $C_s=10.5$ kg·m⁻³.由于试验中没有记录表面氯离子浓度随时间的变化,且氯离子在无裂缝砂浆中的扩散系数是根据氯离子表面浓度为常数的模型计算而来,本文也采用表面氯离子浓度为常数进行对比.图4给出了计算结果与试验数据的对比情况,计算结果与试验数据基本一致,表明本文计算方法具有一定的准确性.

3 氯离子扩散及结构耐久寿命分析

设混凝土的水灰比为 $w/c=0.3$,裂缝宽度取为 0.1 mm、 0.2 mm和 0.3 mm.混凝土表面氯离子吸附系数 $r=2.9 \times 10^{-7}$ s⁻¹.设置2种不同的服役情



a 裂缝宽度较小



b 裂缝宽度较大

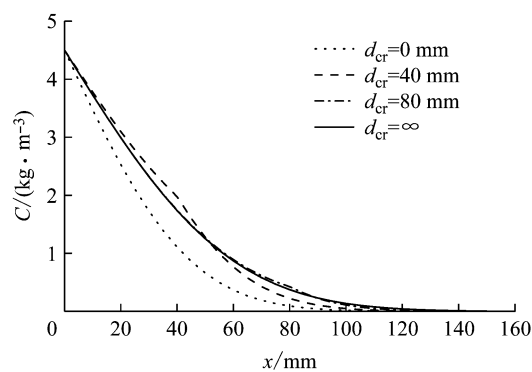
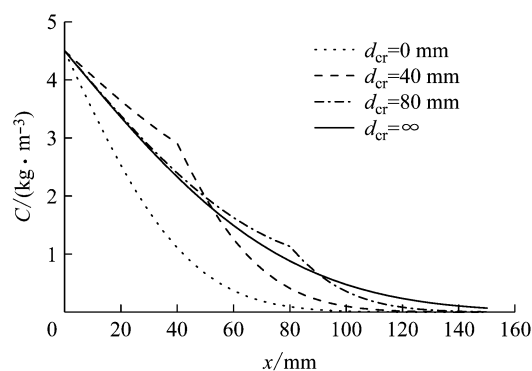
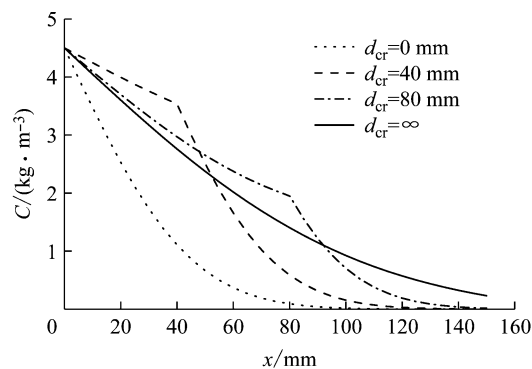
图 4 本文模型与试验数据对比

Fig. 4 Comparison between test data and the model in this paper

况^[11]: ① 假定混凝土结构服役于离海岸线 100 m 处的环境条件, 此时混凝土表面的氯离子浓度稳定值 $C_s = 4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ② 假定混凝土结构服役于海水中, 此时混凝土表面的氯离子浓度稳定值 $C_s = 9.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 设置 2 种不同的保护层厚度 ($d_c = 50 \text{ mm}$ 和 70 mm). 假定临界氯离子浓度 $C_{th} = 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 以下为裂缝深度和宽度对海洋环境中钢筋混凝土结构中氯离子浓度分布和耐久寿命的影响分析.

3.1 裂缝对氯离子浓度分布的影响

图 5 和图 6 分别给出了 2 种服役环境下服役时间为 30 年时混凝土中的氯离子浓度分布. 裂缝的深度分别为 0 mm、40 mm、80 mm 和裂缝贯通的情况. 对于同一服役环境和裂缝宽度, 比较裂缝非贯通条件下和裂缝贯通条件下混凝土中的氯离子浓度分布, 当计算点深度在裂缝深度范围内时, 裂缝非贯通条件下的氯离子浓度大于裂缝贯通条件下的氯离子浓度, 且差值随着深度的增大逐渐增加; 当计算点深度大于裂缝深度时, 随着深度增大, 裂缝非贯通条件下的氯离子浓度迅速降低, 并逐渐趋近于无裂缝条件下的氯离子浓度.

a $w_{cr} = 0.1 \text{ mm}$ b $w_{cr} = 0.2 \text{ mm}$ c $w_{cr} = 0.3 \text{ mm}$ 图 5 $C_s = 4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $t = 30$ 年时混凝土中氯离子浓度分布Fig. 5 Chloride concentration profiles after an exposure period of 30 years for $C_s = 4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

随着裂缝深度增大, 裂缝非贯通条件下的氯离子浓度和裂缝贯通条件下的氯离子浓度整体差异减小. 而当裂缝深度较小时, 两者的差异较大, 采用裂缝贯通情况来计算氯离子浓度分布是不合适的.

随着裂缝宽度的增大, 裂缝非贯通条件下的氯离子浓度和裂缝贯通条件下的氯离子浓度整体差异性增大. 取非贯通裂缝的裂缝深度处的氯离子浓度与裂缝贯通条件下相同深度的氯离子浓度进行比较. 由图 5, 表面氯离子浓度为 $C_s = 4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 服役条件下, 当裂缝宽度 $w_{cr} = 0.1 \text{ mm}$ 时, 非贯通裂缝

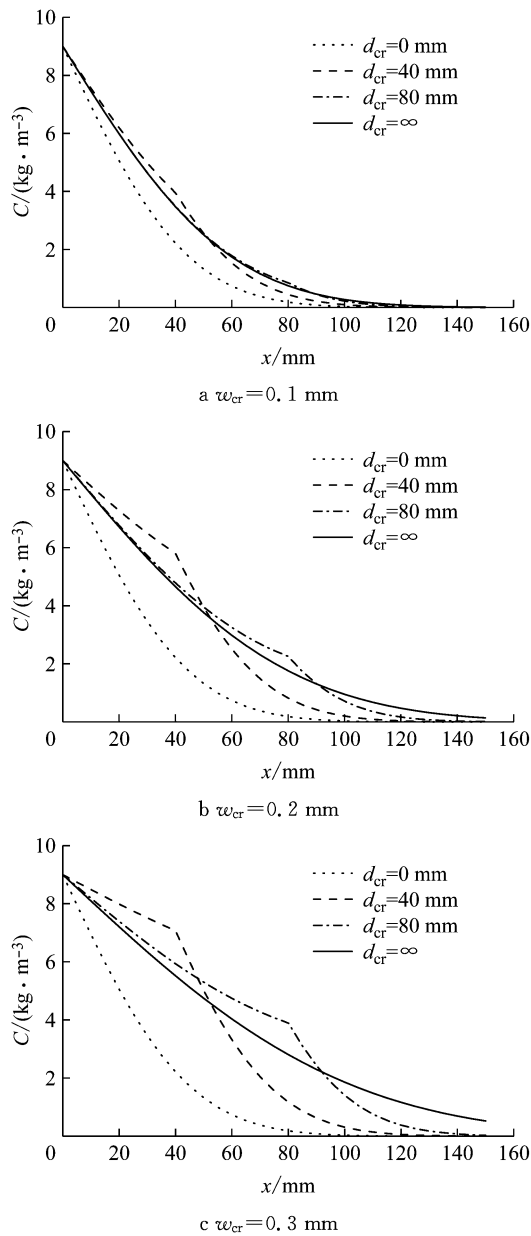


图 6 $C_s = 9.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $t = 30$ 年时混凝土中氯离子浓度分布

Fig.6 Chloride concentration profiles after an exposure period of 30 years for $C_s = 9.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$d_{cr} = 40 \text{ mm}$ 、 $d_{cr} = 80 \text{ mm}$ 在裂缝深度处 ($x = 40 \text{ mm}$ 、 $x = 80 \text{ mm}$) 的氯离子浓度比裂缝贯通情况下 ($d_{cr} = \infty$) 相同深度的氯离子浓度增大了 14.0% 和 14.5%; 当 $w_{cr} = 0.2 \text{ mm}$ 时, 相同条件下氯离子浓度分别增大了 24.9% 和 28.6%; 当 $w_{cr} = 0.3 \text{ mm}$ 时, 相同条件下氯离子浓度分别增大了 28.1% 和 39.1%。

3.2 裂缝对混凝土结构耐久寿命的影响

以钢筋表面氯离子浓度达到临界浓度的时间作为混凝土结构的寿命. 为了研究不同保护层厚度情况下裂缝深度对结构耐久寿命的影响, 对裂缝深度

进行归一化, 得到裂缝深度与保护层厚度比值 d_{cr}/d_c . 图 7 和图 8 分别给出了 2 种不同服役环境下混凝土结构寿命与裂缝宽度和裂缝深度与保护层厚度比值 d_{cr}/d_c 的关系. 从图中可以看出:

当 $d_{cr}/d_c < 1.0$ 时, 随着 d_{cr}/d_c 增大, 钢筋混凝土结构耐久寿命逐渐减小; 当 $d_{cr}/d_c = 1.0$ 时, 结构耐久寿命取得最小值; $d_{cr}/d_c > 1.0$ 时, 随 d_{cr}/d_c 增大, 结构耐久寿命有小幅度的增大, 并逐渐趋于稳定. $d_{cr}/d_c = 1.6$ 时的结构耐久寿命和裂缝贯通时的耐久寿命差值小于 0.1 年, 0.1 年相对于结构的耐久寿命来说是很小的, 所以当 $d_{cr}/d_c > 1.6$ 时, 可按裂缝贯通计算结构耐久寿命. 当 $d_{cr}/d_c < 1.6$ 时, 随着 d_{cr}/d_c 的变化, 结构耐久寿命变化较大, 按照裂缝贯通来计算混凝土结构寿命会带来较大误差.

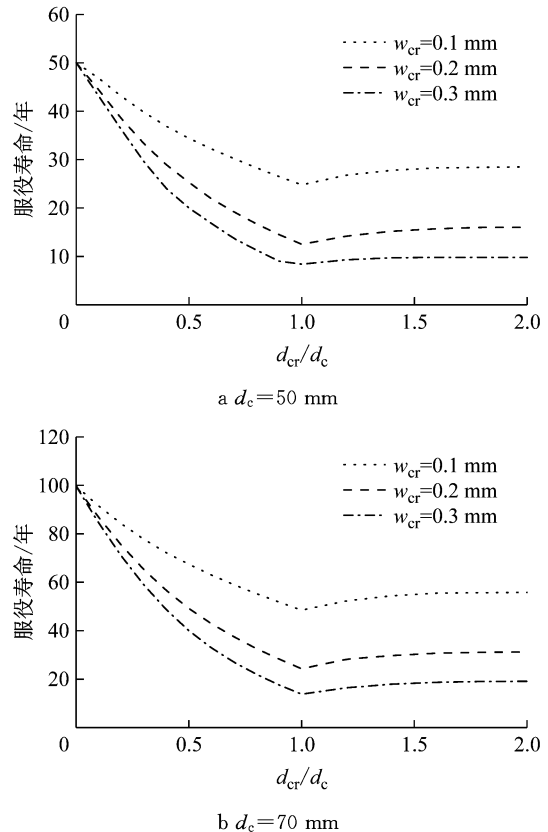


图 7 $C_s = 4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时的混凝土结构寿命

Fig.7 Life of the concrete structure when $C_s = 4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

当 d_{cr}/d_c 由 0 增大到 1.0, 裂缝宽度越大, 带裂缝混凝土结构耐久寿命的变化率越大. 由图 7a, 当 d_{cr}/d_c 由 0 增大到 1.0, 裂缝宽度为 0.1 mm、0.2 mm 和 0.3 mm 的混凝土结构耐久寿命分别降低了 50.4%、75.0% 和 83.2%. 当 d_{cr}/d_c 由 1.0 增大到 1.6, 裂缝宽度越大, 带裂缝混凝土寿命的变化率越

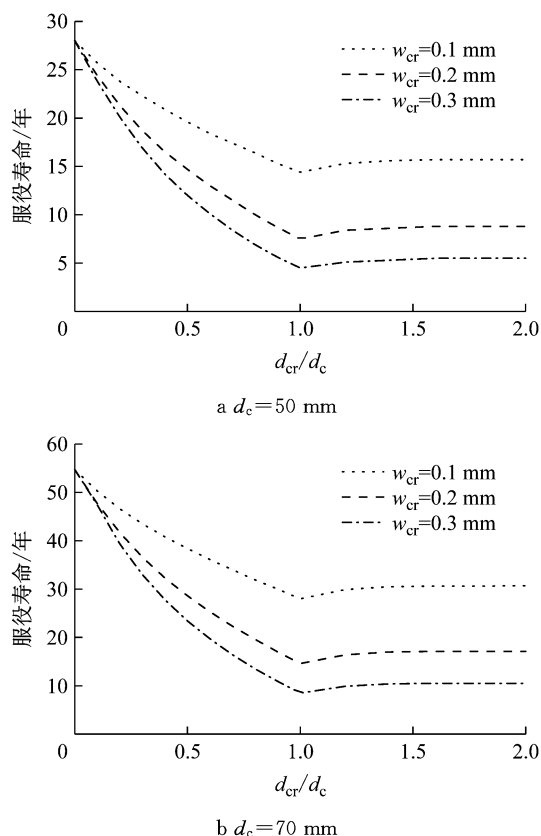


图 8 $C_s = 9.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时的混凝土结构寿命
Fig. 8 Life of the concrete structure when
 $C_s = 9.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

小. 由图 7a, d_{cr}/d_c 由 1.0 增大到 1.6, 裂缝宽度为 0.1 mm、0.2 mm 和 0.3 mm 的钢筋混凝土结构耐久寿命分别增大了 7.4%、7.0% 和 2.8%.

对比图 7a 和 7b 可以看出, 当裂缝宽度、 d_{cr}/d_c 和表面氯离子浓度均相同时, 保护层厚度 $d_c = 50 \text{ mm}$ 的钢筋混凝土结构耐久寿命约为保护层厚度 $d_c = 70 \text{ mm}$ 的结构耐久寿命的 50%. 对比图 7a 和 8a 可以看出, 当裂缝宽度、 d_{cr}/d_c 和保护层厚度均相同时, 服役环境为 $C_s = 4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的钢筋混凝土结构耐久寿命约为服役环境为 $C_s = 9.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的结构耐久寿命的 55%. 这说明服役环境和保护层厚度对于混凝土结构的耐久寿命有重要影响.

4 结论

建立了氯离子在裂缝非贯通条件下混凝土中的扩散方程并获得其解析解. 通过算例分析对裂缝非贯通条件下混凝土结构的耐久寿命进行了预测, 并分析了裂缝宽度、裂缝深度、保护层厚度和服役环境对氯离子浓度分布和结构耐久寿命的影响, 主要结论如下:

(1) 裂缝非贯通条件下的氯离子浓度分布和裂缝贯通条件下的氯离子浓度分布有一定的差异性. 当计算点深度在裂缝深度范围内时, 裂缝非贯通条件下氯离子浓度大于裂缝贯通条件下的氯离子浓度, 且差值随着计算点深度的增大逐渐增加. 当计算点深度超过裂缝深度后, 裂缝非贯通条件下氯离子浓度迅速降低, 且逐渐趋近于无裂缝混凝土结构中的氯离子浓度.

(2) 裂缝的深度越小、宽度越大, 则裂缝非贯通条件下的氯离子浓度与裂缝贯通条件下的氯离子浓度差异越大.

(3) 裂缝深度与保护层厚度比值 $d_{cr}/d_c < 1.0$ 时, 随着 d_{cr}/d_c 增大, 钢筋混凝土结构耐久寿命逐渐减小. 当 $d_{cr}/d_c = 1.0$ 时, 混凝土寿命最小. 当 $d_{cr}/d_c > 1.0$ 时, 随 d_{cr}/d_c 增大, 结构耐久寿命小幅增大, 并逐渐趋于稳定. 当 $d_{cr}/d_c > 1.6$ 时, 结构耐久寿命可近似按裂缝贯通时的情况计算.

(4) 服役环境和保护层厚度对于混凝土结构的耐久寿命有重要影响, 当保护层厚度减小、表面氯离子浓度增大时, 钢筋混凝土结构耐久寿命降低.

参考文献:

- [1] CHEN D, MAHADEVAN S. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2008, 30(3):227.
- [2] GUZMAN S, GALVEZ J C, SANCHO J M. Modelling of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete by an embedded cohesive crack finite element [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, 93(93):92.
- [3] 岳著文, 李镜培, 邵伟. PHC 管桩劈裂试验裂缝开展特征 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(10): 81.
YUE Zhuwen, LI Jingpei, SHAO Wei, *et al.* Crack development characteristic of PHC pipe pile in splitting test [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(10):81.
- [4] SHI X, XIE N, FORTUNE K, *et al.* Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview [J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 30(5):125.
- [5] DJERBI A, BONNET S, KHELIDJ A, *et al.* Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete [J]. *Cement & Concrete Research*, 2008, 38(6):877.
- [6] LIM C C, GOWRIPALAN N, SIRIVIVATNANON V. Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2000, 22(5):353.
- [7] MARSAVINA L, AUDENAERT K, DE SCHUTTER G, *et al.* Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(1):264.
- [8] MU S, DE SCHUTTER G, MA B. Non-steady state chloride

- diffusion in concrete with different crack densities [J]. *Materials and structures*, 2013, 46(1/2):123.
- [9] KWON S J, NA U J, SANG S P, *et al.* Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion[J]. *Structural Safety*, 2009, 31(1):75.
- [10] LU Z H, ZHAO Y G, YU Z W, *et al.* Probabilistic evaluation of initiation time in RC bridge beams with load-induced cracks exposed to de-icing salts[J]. *Cement & Concrete Research*, 2011, 41(3):365.
- [11] SHAO W, LI J. Service life prediction of cracked RC pipe piles exposed to marine environments[J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 64(30):301.
- [12] 赵羽习, 王传坤, 金伟良, 等. 混凝土表面氯离子浓度时变规律试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(3):8. ZHAO Yuxi, WANG Chuankun, JIN Weiliang, *et al.* Experimental analysis on time-dependent law of surface chloride ion concentration of concrete[J]. *Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering*, 2010, 32(3):8.
- [13] PARK S S, KWON S J, SANG H J. Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation [J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 29(4):183.
- [14] YE H, TIAN Y, JIN N, *et al.* Influence of cracking on chloride diffusivity and moisture influential depth in concrete subjected to simulated environmental conditions [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 66.
- [15] 陆春华, 张邵峰, 刘荣桂, 等. 横向弯曲裂缝对混凝土内氯离子侵蚀作用的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(6):124. LU Chunhua, ZHANG Shaofeng, LIU Ronggui, *et al.* Influence of transverse flexural crack on chloride penetration in concrete[J]. *Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(6):124.
- [16] 左国望, 苏骏, 李扬. 氯盐侵蚀环境下裂缝对混凝土内氯离子含量的影响分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2016, 49(2):269. ZUO Guowang, SU Jun, LI Yang. Research on influence of crack width on chloride ion content in concrete in chloride erosion environment [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(2):269.
- [17] BOULFIZA M, SAKAI K, BANTHIA N, *et al.* Prediction of chloride ions ingress in uncracked and cracked concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 2003, 100(1):38.
- [18] SAHMARAN M. Effect of flexure induced transverse crack and self-healing on chloride diffusivity of reinforced mortar[J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(22):9131.