

文章编号:1007-9629(2025)04-0307-08

干湿交替环境下带非贯通裂缝混凝土中氯离子传输规律

彭建新^{1,*}, 程小康¹, 董范君², 杨向红², 李朝²

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 湖南省第六工程有限公司, 湖南 长沙 410015)

摘要:为了获得干湿交替作用下开裂混凝土中氯离子传输规律,通过拉普拉斯变换方法,建立了干湿交替作用下带非贯通裂缝混凝土中的氯离子对流扩散模型,分析了裂缝宽度和裂缝深度对氯离子含量分布的影响,统计了裂缝参数与表面氯离子含量的关系.结果表明:随着裂缝宽度和裂缝深度的增加,混凝土表面氯离子含量积累加快,从而加速了氯离子传输;与现有模型相比,本文理论模型精度提高了30%.

关键词:开裂混凝土结构;氯离子对流扩散;理论模型;干湿交替

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.04.003

Chloride Transport in Concrete With Non-penetrating Cracks Under Dry-Wet Cycles

PENG Jianxin^{1,*}, CHENG Xiaokang¹, DONG Fanjun², YANG Xianghong², LI Chao²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. Hunan No.6 Engineering Co., Ltd., Changsha 410015, China)

Abstract: To investigate the chloride transport behavior in cracked concrete under dry-wet cycles, a chloride convection-diffusion model for non-penetrating cracks in concrete was developed using the Laplace transform. The effects of crack width and depth on the chloride content distribution was analyzed and the relationship between crack parameters and surface chloride content was established in the model. The results indicate that as the crack width and depth increase, the accumulation of surface chloride in concrete accelerates, thereby enhancing chloride transport. Compared with existing models, the proposed theoretical model improves prediction accuracy by 30%.

Key words: cracked concrete structure; chloride convection-diffusion; analytical model; dry-wet cycle

在钢筋混凝土结构的应用过程中,由于材料性能、环境条件、施工技术及荷载等多种因素的影响^[1-5],导致混凝土结构中产生新的裂缝,从而对混凝土结构的耐久性造成不利影响.Ye等^[3]设计了一系列干湿交替环境下开裂混凝土的氯离子传输试验,研究表明较大的裂缝深度会影响氯离子的扩散深度.延永东等^[6]通过试验研究发现,在相同深度下,干湿交替环境中开裂混凝土的氯离子浓度高于饱和状态时的氯离子浓度.目前,氯离子传输试验方法存在诸

多缺陷,如需要大量的样本和较长的试验时间,使得数值分析成为一种新的研究方法^[7-9].与试验方法相比,数值分析在可重复性和效率方面具有优势^[10-11].然而,现有的数值分析方法^[12-13]在网格划分中采用多次近似和逐步收敛的方法,导致大量的计算需求和更高的成本^[14].相反,利用不饱和混凝土中对流扩散方程的闭合解可以有效预测氯离子的扩散规律,减少因大量数据输入而导致的计算过载等问题^[15].由于开裂混凝土存在传输路径和裂缝几何形状的变化,

收稿日期:2024-06-05;修订日期:2024-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078056,52378125,52208166);“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFB2600900);湖南省研究生科研创新重点项目(CX20220853)

第一作者(通讯作者):彭建新(1978—),男,江西吉安人,长沙理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail: jianxinpeng@csust.edu.cn

这些都会显著影响混凝土基体中的氯离子传输^[16].目前的理论模型不适用于分析开裂混凝土中氯离子和水分子的传输.因此,迫切需要发展一种适用于干湿交替作用下损伤混凝土中氯离子对流扩散的理论模型.本文通过拉普拉斯变换方法建立了带裂缝非饱和混凝土中氯离子对流扩散理论模型,研究了裂缝宽度和裂缝深度对非饱和混凝土中氯离子传输的影响,统计了裂缝参数与表面氯离子含量的关系,并通过试验验证了所提出理论模型的正确性.

1 氯离子在带裂缝非饱和混凝土中的传输模型

1.1 对流扩散方程

在开裂混凝土结构中,氯离子的对流扩散是一

个极为复杂且受到多因素影响的传输过程.为了降低问题的复杂度并提升求解的可行性,本文作如下假设:

(1)氯离子在裂缝附近的传输为一维对流扩散,如图1所示.其中在裂缝的深度范围内和范围外,氯离子扩散系数分别为 $D_{Cl,eq}$ 、 $D_{Cl,0}$,在裂缝深度范围内的湿润和干燥状态下水分扩散系数分别为 $D_{ws,eq}$ 和 $D_{wd,eq}$,在裂缝深度范围外的湿润和干燥状态下水分扩散系数分别为 $D_{ws,0}$ 、 $D_{wd,0}$.

(2)裂缝延伸方向正对钢筋,混凝土表面的氯离子浓度以及湿润和干燥状态下的水分饱和度均为常数.

(3)在拉普拉斯变换中,拉普拉斯变量只取实数部分,且数值大于0^[17].

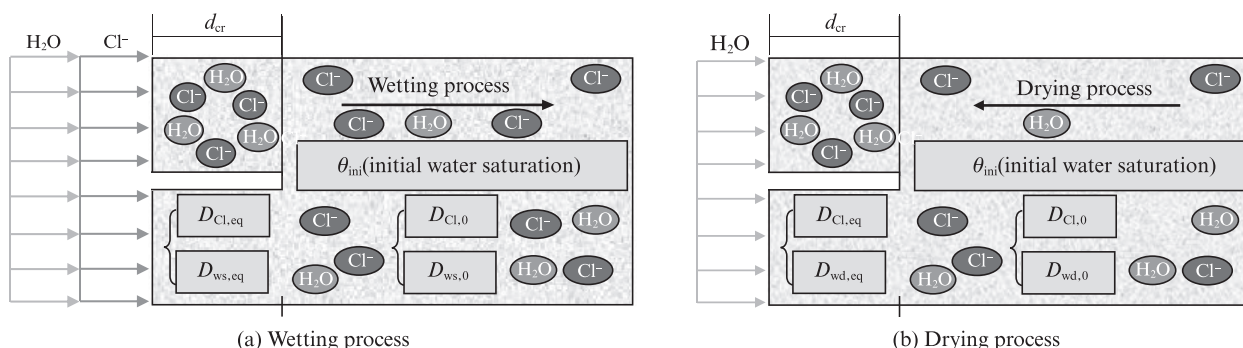


图1 带裂缝非饱和混凝土中氯离子扩散示意图

Fig. 1 Schematic diagram of chloride diffusion in unsaturated concrete with cracks

(4)在复杂的拉普拉斯变换中,高阶项的计算工作量较大,且容易引入误差,忽略高阶项计算能够保证结果的精度较高^[18],因此本研究采用忽略高阶项的方法.

(5)假设裂缝为单一裂缝,忽略裂缝之间的相互

影响.

(6)暂不考虑裂缝开展及钢筋作用对混凝土中氯离子对流扩散的影响.

设裂缝的深度为 d_{cr} ,带裂缝混凝土结构中氯离子对流扩散方程见式(1).

$$\begin{cases} \frac{\partial C_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{Cl,eq} \frac{\partial C_1}{\partial x} + D_{ws(d),eq} C_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \right), & 0 < x \leq d_{cr} \\ \frac{\partial C_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{Cl,0} \frac{\partial C_2}{\partial x} + D_{ws(d),0} C_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \right), & x > d_{cr} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $D_{ws(d),eq}$ 为 $D_{ws,eq}$ 或 $D_{wd,eq}$; $D_{ws(d),0}$ 为 $D_{ws,0}$ 或 $D_{wd,0}$; C_1 、 θ_1 分别为裂缝深度范围内的氯离子浓度、水分饱和度; C_2 、 θ_2 分别为裂缝深度范围外的氯离子浓度、水分饱和度; t 为扩散时间; x 为扩散深度.

湿润条件下,氯离子对流扩散方程的初始条件见式(2).边界条件见式(3).

$$\begin{cases} C_1 = 0, \theta_1 = \theta_{ini}, & 0 < x < d_{cr} \\ C_2 = 0, \theta_2 = \theta_{ini}, & x > d_{cr} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} C_{1(w)} = C_s [1 - \exp(-rt)], \theta_{1(w)} = \theta_m - \exp(-\sqrt{t}) \\ C_{1(w)} = C_{2(w)}, \theta_{1(w)} = \theta_{2(w)}, D_{Cl,eq} \frac{dC_{1(w)}}{dx} = D_{Cl,0} \frac{dC_{2(w)}}{dx}, D_{ws,eq} \frac{d\theta_{1(w)}}{dx} = D_{ws,eq} \frac{d\theta_{2(w)}}{dx}, & x = d_{cr} \\ C_{2(w)} = 0, \theta_{2(w)} = 1, & x \rightarrow \infty \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_{ini} 为初始水分饱和度; $C_{1(w)}$ 、 $C_{2(w)}$ 分别为裂缝区域和非裂缝区域在湿润状态下的氯离子浓度; $\theta_{1(w)}$ 、

$\theta_{2(w)}$ 分别为裂缝区域和非裂缝区域在湿润状态下的水分饱和度; C_s 为混凝土表面氯离子浓度的稳定值;

θ_m 为 $x=0$ 时湿润状态下的水分饱和度; r 为常数,一般取 -10^{-5} 。

1.2 方程的求解

式(1)是双变量二阶偏微分方程,采用拉普拉斯变换对其进行求解,得到带裂缝混凝土结构中氯离子对流扩散的拉普拉斯变换式。

随后采用文献[19]中的方法对水分扩散方程进行拉普拉斯变换,并代入带裂缝混凝土结构中氯离子

子对流扩散的拉普拉斯变换式,忽略高阶项^[17],得到含未知变量的氯离子扩散解析方程。通过对式(3)进行拉普拉斯变换,并代入含未知变量的氯离子扩散解析方程中,整理后得到干湿交替作用下带裂缝混凝土的氯离子对流扩散拉普拉斯方程。将其代入拉普拉斯逆变换卷积公式中,采用改进的Talbot方法进行求解^[20],得到湿润状态下带裂缝混凝土中氯离子对流扩散方程的近似解析式,见式(4)。

$$\begin{cases} C_{1(w)} = \theta_{ini} C_s \theta_m d_{cr}^2 \left(1 + \operatorname{erf} \frac{d_{cr}}{2\sqrt{D_{ws,eq}t}} \right) (2-x) + \frac{3C_s D_{ws,eq} \theta_m^2 d_{cr}^2}{2D_{Cl,eq}} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{1+x}{2\sqrt{D_{ws,eq}t}} \right) (D_{ws,eq} - 2D_{ws,0}) \\ C_{2(w)} = \theta_{ini} \left[C_s + \frac{C_s x^2}{2D_{Cl,0}} - \frac{C_s x^2 \theta_m D_{ws,eq}}{2D_{Cl,0}} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{2d_{cr}-x}{2\sqrt{D_{ws,eq}t}} \right) \right] \end{cases} \quad (4)$$

对于干燥状态的带裂缝混凝土,初始条件下氯离子浓度和水分饱和度未发生改变。值得注意的是

边界条件下氯离子浓度和水分饱和度发生了改变^[13],用式(5)表示。

$$\begin{cases} C_{1(d)} = C_d, \theta_{1(d)} = \theta_s, x = 0 \\ C_{1(d)} = C_{2(d)}, \theta_{1(d)} = \theta_{2(d)}, D_{Cl,eq} \frac{\partial C_{1(d)}}{\partial x} = D_{Cl,0} \frac{\partial C_{2(d)}}{\partial x}, x = d_{cr} \\ C_{2(d)} = 0, \theta_{2(d)} = 0, x \rightarrow \infty \end{cases} \quad (5)$$

式中: $C_{1(d)}$ 、 $C_{2(d)}$ 分别为裂缝区域和非裂缝区域在干燥状态下的氯离子浓度; $\theta_{1(d)}$ 、 $\theta_{2(d)}$ 分别为裂缝区域和非裂缝区域在干燥状态下的水分饱和度; C_d 为干燥状态下混凝土表面氯离子浓度的稳定值; θ_s 为 $x=0$ 时

干燥状态下的水分饱和度。

采用类似的拉普拉斯变换方法,求解得到干燥状态下带裂缝混凝土中氯离子对流扩散方程的近似解析式,见式(6)。

$$\begin{cases} C_{1(d)} = \theta_{ini} \left[(D_{wd,0} - D_{wd,eq}) + C_d \theta_s d_{cr}^2 \left(1 + \operatorname{erf} \frac{d_{cr}}{2\sqrt{D_{wd,eq}t}} \right) \right] (C_d - x) + \frac{C_d D_{wd,0} \theta_s^2 d_{cr}^2 x^3}{2D_{Cl,eq}} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{3d_{cr}-x}{2\sqrt{D_{wd,eq}t}} \right) \\ C_{2(d)} = \theta_{ini} \left[C_d + \frac{C_d x^2}{2D_{Cl,0}} - \frac{C_d x^2 \theta_s D_{ws,eq}}{2D_{Cl,0}} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{2d_{cr}-x}{2\sqrt{D_{wd,eq}t}} \right) \right] \end{cases} \quad (6)$$

上述式(4)、(6)计算的是首次干湿交替过程中的氯离子浓度。在第2次湿润状态下,氯离子浓度的初始值为首次干燥结束后的氯离子浓度。对于裂缝区的氯离子浓度,除表层氯离子浓度外,其他深度处的氯离子浓度依次叠加,得到最后一次湿润状态下的氯离子浓度解析式。

$$\begin{cases} C_{1(w),s} = C_{1(w)} + \sum_{i=1}^N (C_{1(w,a),i} + C_{1(d,a),i}) \\ C_{2(w),s} = \sum_{i=1}^N (C_{2(w,a),i} + C_{2(d,a),i}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $C_{1(w),s}$ 、 $C_{2(w),s}$ 分别表示最后一次湿润状态下裂缝区和非裂缝区的氯离子浓度; $C_{1(w,a),i}$ 、 $C_{1(d,a),i}$ 分别为湿润和干燥状态下除表层外,第2次及第*i*次的裂缝

区氯离子浓度; $C_{2(w,a),i}$ 、 $C_{2(d,a),i}$ 分别为湿润和干燥状态下除表层外,第2次及第*i*次的非裂缝区氯离子浓度。试验时采用文献[16]的方法把氯化物浓度转化为氯离子含量(质量分数)。

裂缝宽度对混凝土中氯离子扩散的影响显著。当裂缝宽度达到一定值后,混凝土中氯离子扩散系数将维持在一个稳定值。通常采用金浏等^[21]的单裂缝氯化物扩散系数模型进行分析。开裂混凝土中水分路径的扩散会发生变化。Aldea等^[22]研究得出了湿润状态下开裂混凝土中水分扩散系数模型,该模型已被广泛应用,相关参数的取值依据文献[23]。本文中干燥状态下,裂缝外和裂缝处的水分扩散系数按照文献[24]进行取值。

2 试验研究

2.1 试验原材料

本文采用C50混凝土制备了一批钢筋混凝土梁和立方体混凝土试块,其中水泥为湖南长沙南方水泥厂生产的P·O 42.5级水泥;细骨料为湘江某处的普通河砂,细度模数在2.75左右,属于中砂,级配为Ⅱ区;粗骨料为长沙浏阳永利碎石加工厂的岩浆岩碎石,为5~25 mm连续级配;水为普通自来水.钢

筋混凝土梁的横截面尺寸为150 mm×200 mm,长度为1 000 mm,如图2所示.主筋和纵筋的布置也如图2所示.箍筋采用直径为6 mm的HRB400钢筋.梁的下端安装有预应力钢绞线,其公称直径为15.2 mm,抗拉强度为1 860 MPa.HRB400钢筋的抗拉屈服强度为400 MPa.立方体混凝土试块的边长为150 mm,用于测试混凝土的抗压强度 f_{ck} 和抗拉强度 f_{tk} .混凝土的配合比及强度如表1所示.采用压汞法测得混凝土的孔隙率(体积分数)为40%.

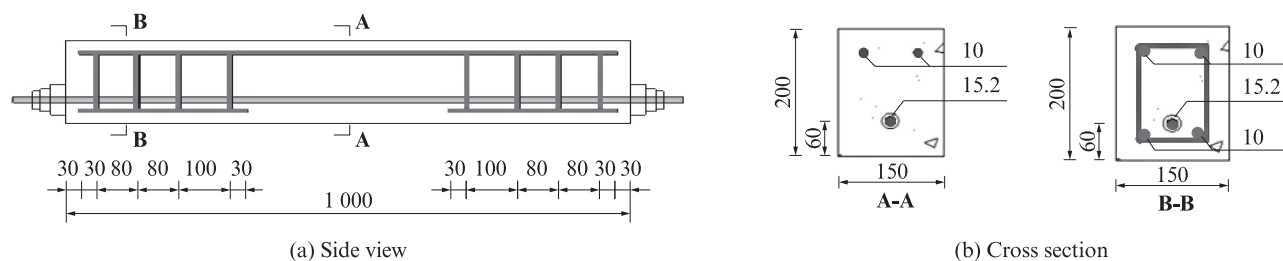


图2 钢筋混凝土梁的尺寸和配筋详图

Fig. 2 Dimension and reinforcement details of reinforced concrete beams (size: mm)

表1 混凝土配合比及强度

Table 1 Concrete mix proportion and strength

Mix proportion/(kg·m ⁻³)				$f_{ck}/$ MPa	$f_{tk}/$ MPa
Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate		
180	450	566	1 204	32.40	2.64

2.2 试验梁裂缝制备

对混凝土梁采用非机械力学无损方法制备裂

缝,如图3所示.主要步骤如下:(1)采用厚度分别为0.1、0.2、0.3 mm的100 mm×100 mm铜片插入混凝土试验梁模板的指定位置并固定;(2)浇筑混凝土,混凝土梁养护完成后,在不损坏混凝土的情况下,轻轻拉出铜片,让预制裂缝定型.经裂缝观测仪观测,混凝土试验梁张拉后裂缝尺寸未发生明显变化.

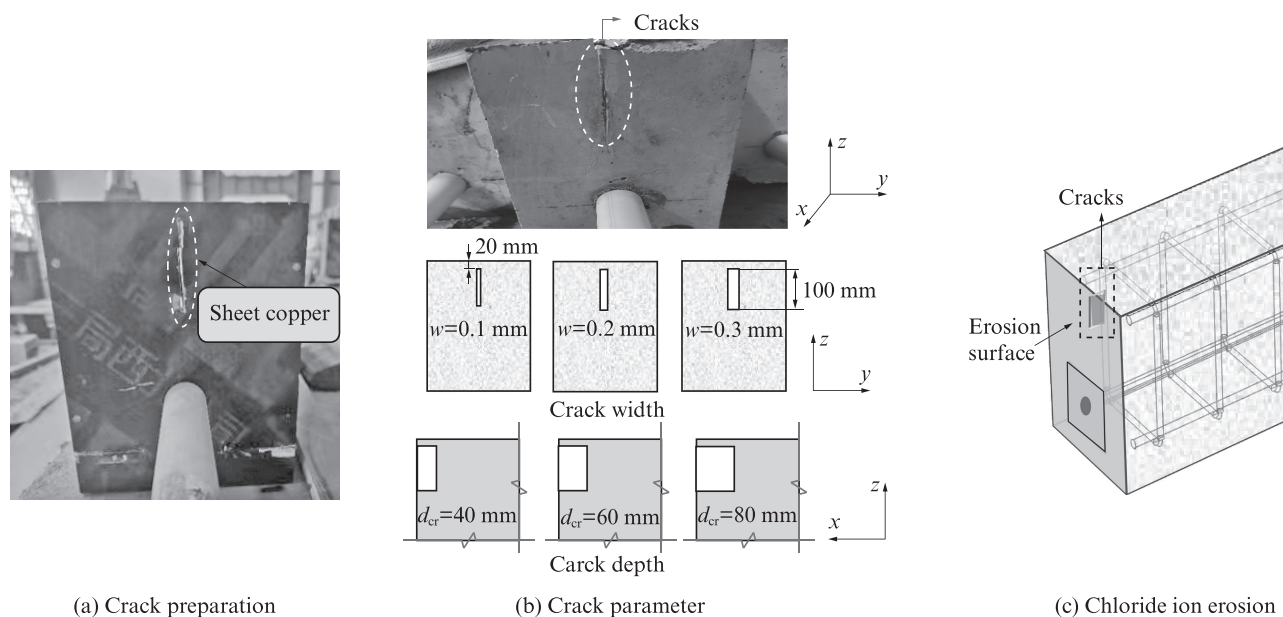


图3 带非贯通裂缝非饱和混凝土中氯离子传输试验

Fig. 3 Chloride transport experiment in unsaturated concrete with non-penetrating cracks

根据试验目的和裂缝开展类型,设计了不同的裂缝宽度 w 和深度 d_{cr} (见图3),以定量研究混凝土梁的裂缝特征对表面氯离子积聚与内部传输交互的影响.此外,采用无裂缝的试验梁作为对照组.混凝土梁试件编号见表2.

表2 混凝土梁试件编号

Table 2 Number of concrete beam specimens

Specimen	w/mm	d_{cr}/mm	Specimen	w/mm	d_{cr}/mm
C0	0	0	C-0.2-60	0.2	60
C-0.1-40	0.1	40	C-0.2-80	0.2	80
C-0.1-60	0.1	60	C-0.3-40	0.3	40
C-0.1-80	0.1	80	C-0.3-60	0.3	60
C-0.2-40	0.2	40	C-0.3-80	0.3	80

2.3 干湿交替试验

文献[25-26]指出,当干湿时间比为3:1时,混凝土性能退化最为严重.此外,考虑到一次昼夜潮汐为24 h,采用干燥18 h、湿润6 h的干湿时间机制,以及120 d的循环周期能够较好地模拟实际环境中潮汐对混凝土结构的影响^[27].本研究采用该干湿时间比及循环周期来分析裂缝参数对非饱和混凝土中氯离子传输的影响.除图3(c)所示的渗透面以外,其他区域均涂覆环氧树脂进行无渗透处理.采用质量分数为5%的NaCl溶液,对钢筋混凝土梁进行了干湿交替环境下的一维氯离子侵蚀试验.在试验过程中,干燥环境的相对湿度稳定维持在40%.试验结束后,对混凝土侵蚀面的结晶盐进行处理,并在裂缝损伤区域进行钻孔取芯,按距表面0~20.0 mm范围内每2.0 mm取1次样、20.0~40.0 mm范围内每5.0 mm取1次样、

40.0~50.0 mm范围内取1次样^[1],取样位置依次记为1.0、3.0、5.0、7.0、9.0、11.0、13.0、15.0、17.0、19.0、22.5、27.5、32.5、37.5、45.0 mm,每组取3个芯样.利用氯离子含量测试仪对芯样的氯离子含量进行测试,结果取平均值.把1.0 mm处的氯离子含量作为表面氯离子含量.

3 结果分析

3.1 裂缝宽度

图4展示了不同裂缝宽度下混凝土中的氯离子含量分布.从图4(a)可以看出,试件C-0.1-40的氯离子含量大于试件C0,试件C-0.1-80的氯离子含量平均值是C0试件的1.78倍.随着裂缝宽度的增加,相同裂缝深度下的试件氯离子含量差距增大.在图4(b)中,试件C-0.2-80的氯离子含量比试件C-0.2-40平均增加了0.08%.在图4(c)中,试件C-0.3-80的氯离子含量比试件C-0.3-40平均增加了0.11%.从图5还可以看出,氯离子含量峰值随着裂缝宽度的增加而增大,其对应的对流区深度也随之增大.试件C-0.1-40和C-0.1-60的氯离子含量峰值分别为0.34%、0.37%,其对流区深度均为9 mm,而试件C-0.1-80的氯离子含量峰值为0.39%,其对流区深度为11 mm.试件C-0.2-40、C-0.2-60和C-0.2-80的氯离子含量峰值分别为0.41%、0.45%、0.49%,其对流区深度分别为11、13、15 mm.试件C-0.3-80的氯离子含量峰值为0.59%,其对流区深度为17 mm,而试件C-0.3-40和C-0.3-60的对流区深度分别为13、15 mm.

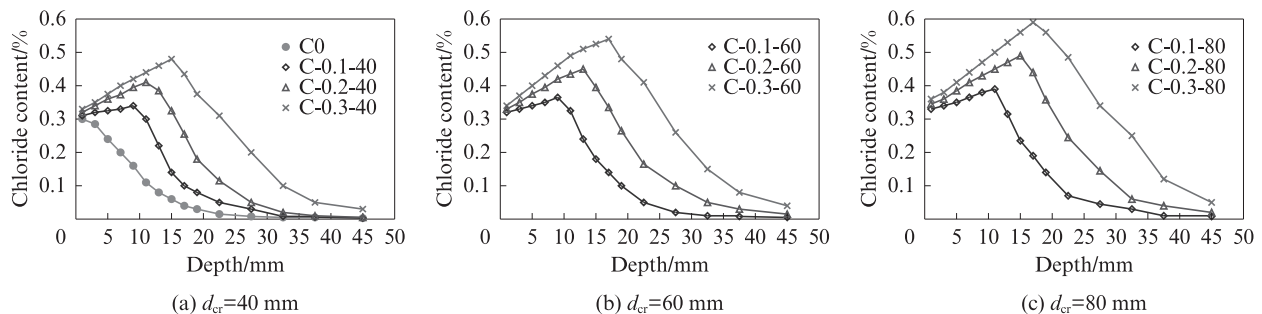


图4 不同裂缝宽度下混凝土中的氯离子含量分布

Fig. 4 Distribution of chloride content in concrete under different crack widths

裂缝宽度对氯离子在混凝土内部传输的影响主要体现在裂缝为氯离子提供了低阻力的渗透通道,显著增加了氯离子的扩散速率^[1, 4].在干湿循环环境中,裂缝的存在增加了对流区的深度,加速了水分和氯离子的迁移.孔隙结构和多种离子耦合效应使水分和氯离子在混凝土中的传输更加复杂^[28-29].裂缝宽

度的增加,使氯离子的扩散系数显著增大,对氯离子浓度梯度的影响也愈发显著^[16, 30].

3.2 裂缝深度

图5描述了不同裂缝深度下非饱和混凝土中的氯离子含量分布规律.通过图5可以看出,在相同裂缝深度下,氯离子含量随着裂缝宽度的增加呈现规

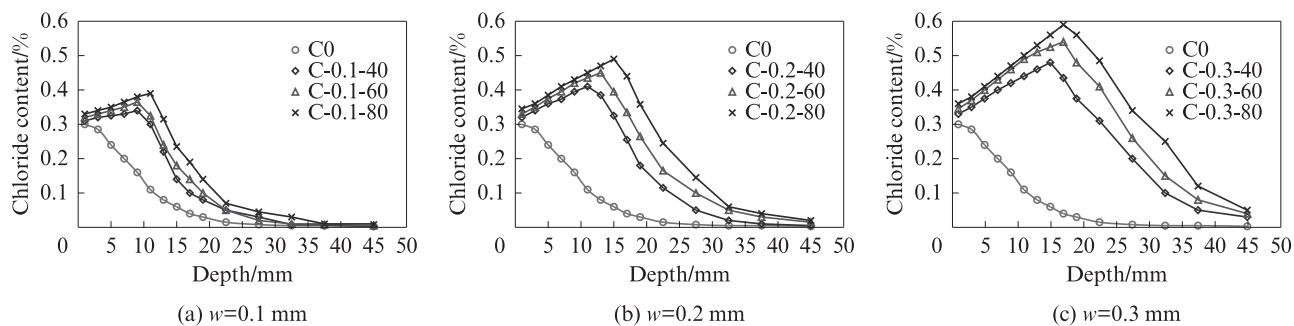


图5 不同裂缝深度下混凝土中的氯离子含量分布

Fig. 5 Distribution of chloride content in concrete under different crack depths

律性增大;随着裂缝深度的增加,裂缝宽度为0.3 mm试件的氯离子含量增大较为明显,但与裂缝宽度为0.1、0.2 mm的试件仍保持规律性差异;随着裂缝深度的增加,混凝土中氯离子的渗透深度也随之增加。因此,当裂缝深度和裂缝宽度都增大时,氯离子的渗透深度更大。

3.3 表面氯离子积聚

图6给出了各混凝土梁的表面氯离子含量分布。从图6可以看出,当裂缝深度为80 mm且裂缝宽度为0.3 mm时,表面氯离子含量相比于裂缝深度为40 mm且裂缝宽度为0.1 mm时增加了0.05%。这表明在干湿交替环境下,水分和氯离子会通过裂缝渗透到混凝土内部^[30]。裂缝宽度越大,渗透路径越宽,水分和氯离子的进入速率越大,从而导致表面氯离子含量增加。裂缝深度越深,氯离子在混凝土内部扩散的路径越长,累积的表面氯离子含量也越高。

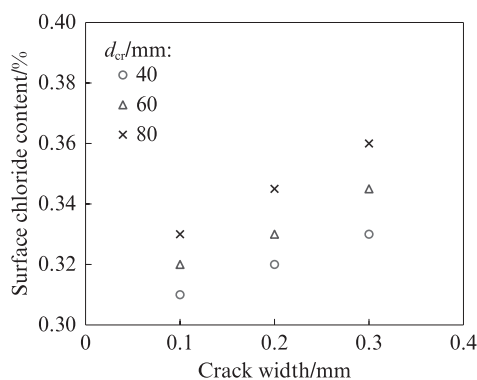


图6 表面氯离子含量分布

Fig. 6 Surface chloride content distribution

4 模型验证

模型相关参数的取值^[13,22-24,31]见表3、4,其中 $D_{Cl,0}$ 、 $D_{ws,0}$ 和 $D_{wd,0}$ 分别取 7×10^{-12} 、 2×10^{-10} 、 $1.39 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。通过试验数据验证本文式(4)、(6)、(7),并结合文献[10]中模型进行对比分析,相关验证

表3 氯离子和水分扩散系数取值

Table 3 Chloride and moisture diffusion coefficient values

Parameter	Crack parameter		Value/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Reference
	w/mm	d_{cr}/mm		
$D_{Cl,eq}$	0.1	40, 60, 80	7.00×10^{-12}	[22]
	0.2	40, 60, 80	1.05×10^{-11}	
	0.3	40, 60, 80	2.03×10^{-9}	
$D_{wd,eq}$	0.1	40, 60, 80	4.424×10^{-11}	[23]
	0.2	40, 60, 80	4.524×10^{-11}	
	0.3	40, 60, 80	5.624×10^{-11}	
$D_{ws,eq}$	0.1, 0.2, 0.3	40	1.39×10^{-10}	[24]
	0.1, 0.2, 0.3	60	1.56×10^{-10}	
	0.1, 0.2, 0.3	80	1.78×10^{-10}	

表4 模型相关参数取值

Table 4 Values of model relevant parameters

Parameter	Value	Reference
θ_{mi}	1.00	[13]
θ_m	1.00	[13]
θ_s	0.45	[13]
$C_s/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	8.746	[22]
$C_d/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	0.543	[31]

见图7。

从图7可以看出,本文理论模型计算结果与试验值吻合良好,表明本文理论模型在分析干湿交替作用下带非贯通裂缝混凝土中的氯离子传输方面具有正确性。本文理论模型预测精度相较于文献[10]中的模型提高了30%。这可能是由于文献[10]中的模型在计算氯离子和水分扩散系数时,未考虑裂缝宽度和裂缝深度对液态水、饱和水蒸气密度及水黏滞动力系数等参数的影响,且计算时采用了有限差分方法,导致最终结果的精度较低。而本文提出的模型通过直接计算偏微分方程,对相关参数的假设及忽略均在合理范围内^[16-18],从而使得其求解精度高于文献[10]中的模型。

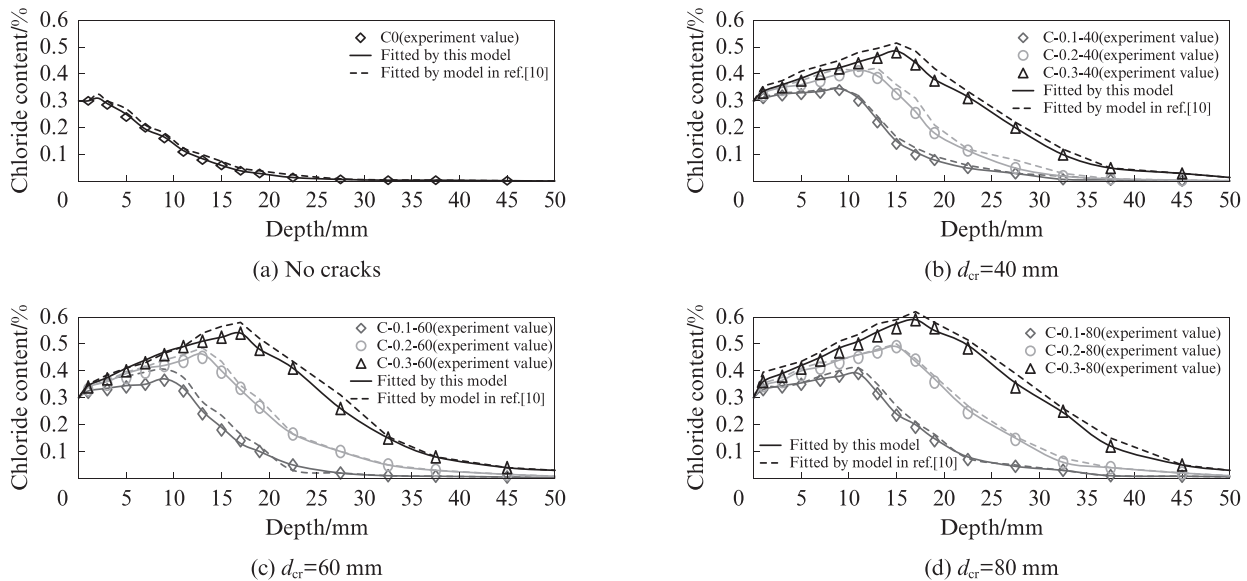


图7 理论模型验证

Fig. 7 Theoretical model verification

5 结论

(1)对于干湿交替环境下的带裂缝混凝土梁,裂缝宽度的增加加速了氯离子在混凝土内部的传输,当裂缝宽度较大时,裂缝深度对混凝土中氯离子扩散的影响较为显著。

(2)随着裂缝深度和裂缝宽度的增加,混凝土表面氯离子含量积累加快。裂缝深度为80 mm且裂缝宽度为0.3 mm混凝土试件的氯离子含量相比于裂缝深度为40 mm且裂缝宽度为0.1 mm试件增加了0.05%。

(3)通过拉普拉斯变换方法,建立了干湿交替环境下带非贯通裂缝混凝土结构中氯离子对流扩散的理论模型,并通过试验数据验证了该模型的有效性。相比于现有文献模型,本文提出的理论模型精度提高了30%。

本研究涉及的工况种类及试验数据有限,另外试验结果可能存在一定的离散性。因此对于实际工程,应在此文结论的基础上根据具体情况进行具体分析。

参考文献:

- [1] TONG L Y, XIONG Q X, ZHANG Z, et al. A novel lattice model to predict chloride diffusion coefficient of unsaturated cementitious materials based on multi-typed pore structure characteristics[J]. Cement and Concrete Research, 2024, 176: 107351.
- [2] 童良玉, 刘清风. 考虑多尺度非均质性的混凝土传输性能预测模型[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(10):1062-1071.

TONG Liangyu, LIU Qingfeng. Modelling of concrete transport property by considering multi-scale heterogeneous characteristics [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(10):1062-1071. (in Chinese)

- [3] YE H L, JIN N G, JIN X Y, et al. Model of chloride penetration into cracked concrete subject to drying-wetting cycles [J]. Construction and Building Materials, 2012, 36:259-269.
- [4] XIONG Q X, LIU Q F, ZHANG X J, et al. Chloride diffusion prediction in concrete through mathematical models based on time-dependent diffusion coefficient and surface chloride concentration[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(11):04022309.
- [5] 阳逸鸣, 周成坤, 陈欢, 等. 考虑参数空间相关性的RC结构初锈时间预测[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(5):24-30.
YANG Yiming, ZHOU Chengkun, CHEN Huan, et al. Prediction of initial corrosion time of RC structures considering spatial correlation of parameters[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(5):24-30. (in Chinese)
- [6] 延永东, 金伟良, 王海龙, 等. 干湿交替作用下氯离子在开裂混凝土中的输运规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(5):2060-2067.
YAN Yongdong, JIN Weiliang, WANG Hailong, et al. Chloride transport in cracked concrete under wet-dry cycling condition[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(5):2060-2067 (in Chinese)
- [7] 蔡渝新, 刘清风. 碱激发混凝土抗氯离子侵蚀性能的数值研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(6):596-603, 622.
CAI Yuxin, LIU Qingfeng. Numerical estimation on chloride erosion resistance of alkali-activated concrete [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6):596-603, 622. (in Chinese)
- [8] PENG J X, HU S W, ZHANG J R, et al. Influence of cracks on chloride diffusivity in concrete: A five-phase mesoscale model approach[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 587-596.

- [9] WANG L, DAI L Z, BIAN H B, et al. Concrete cracking prediction under combined prestress and strand corrosion[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(3):285-295.
- [10] 鲍玖文. 持载及裂缝对混凝土中水分和氯离子传输性能的影响[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
BAO Jiufen. Influence of sustained loading and cracks on the transport properties of water and chloride within concrete[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [11] 蔡栋兴, 毕文彦, 管学茂. 粗骨料对混凝土氯离子扩散影响的模拟与试验[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(4):383-388.
CAI Dongxing, BI Wenyan, GUAN Xuemao. Simulation and experiments of the effect of coarse aggregates on the diffusion of chloride ions in concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(4):383-388. (in Chinese)
- [12] 胡守旺, 龙永康, 符峰源, 等. 滨海饱和混凝土中氯离子传输行为的细观模拟研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(5):17-23.
HU Shouwang, LONG Yongkang, FU Fengyuan, et al. Mesoscopic simulation study on chloride ion transport behavior in marine saturated concrete[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(5):17-23. (in Chinese)
- [13] CHEN D S, YANG K K, HU D L, et al. A meso-stochastic research on the chloride transport in unsaturated concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273:121986.
- [14] ZHANG T, GUO Q X. The finite difference/finite volume method for solving the fractional diffusion equation[J]. Journal of Computational Physics, 2018, 375:120-134.
- [15] PETCHERDCHOO A. Closed-form solutions for modeling chloride transport in unsaturated concrete under wet-dry cycles of chloride attack[J]. Construction and Building Materials, 2018, 176:638-651.
- [16] LIU Q F, YANG J, XIA J, et al. A numerical study on chloride migration in cracked concrete using multi-component ionic transport models[J]. Computational Materials Science, 2015, 99:396-416.
- [17] CORINTHIOS M J. Complex-variable distribution theory for Laplace and z transforms[J]. IEEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing, 2005, 152(1):97-106.
- [18] OLSON D R. A series approximation to the Kirchhoff integral for Gaussian and exponential roughness covariance functions[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2021, 149(6):4239-4247.
- [19] GUPTA S, KUMAR D, SINGH J. Analytical solutions of convection-diffusion problems by combining Laplace transform method and homotopy perturbation method [J]. Alexandria Engineering Journal, 2015, 54(3):645-651.
- [20] DINGFELDER B, WEIDEMAN J A C. An improved Talbot method for numerical Laplace transform inversion[J]. Numerical Algorithms, 2015, 68(1):167-183.
- [21] 金浏, 杜修力, 李悦. 氯离子在饱和混凝土裂缝中的扩散系数分析[J]. 工程力学, 2016, 33(5):50-56, 73.
JIN Liu, DU Xiuli, LI Yue. Study on chloride diffusivity coefficient in cracks within saturated concrete[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5):50-56, 73. (in Chinese)
- [22] ALDEA C M, SHAH S P, KARR A. Effect of cracking on water and chloride permeability of concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(3):181-187.
- [23] WANG K J, JANSEN D C, SHAH S P. Permeability study of cracked concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(3):381-393.
- [24] WANG L C, BAO J W, UEDA T. Prediction of mass transport in cracked-unsaturated concrete by mesoscale lattice model[J]. Ocean Engineering, 2016, 127:144-157.
- [25] CHEN C H, WANG L, LIU R G, et al. Chloride penetration of concrete exposed to dry-wet cycle with various dry-wet ratios and temperature[J]. Construction and Building Materials, 2023, 400:132883.
- [26] WANG K, GUO J J, WU H, et al. Influence of dry-wet ratio on properties and microstructure of concrete under sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263:120635.
- [27] WANG Y Z, GUO S, YAN B C, et al. Experimental and analytical investigation on chloride ions transport in concrete considering the effect of dry-exposure ratio under diurnal tidal environment[J]. Construction and Building Materials, 2022, 328:127138.
- [28] 陈伟康, 刘清风. 干湿交替下混凝土中水分和多离子耦合传输的数值研究[J]. 水利学报, 2021, 52(5):622-632.
CHEN Weikang, LIU Qingfeng. Moisture and multi-ions transport in concrete under drying-wetting cycles: A numerical study [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(5):622-632. (in Chinese)
- [29] MENG Z Z, ZHANG Y F, CHEN W K, et al. A numerical study of moisture and ionic transport in unsaturated concrete by considering multi-ions coupling effect[J]. Transport in Porous Media, 2024, 151(2):339-366.
- [30] LIU Q F, HU Z, WANG X E, et al. Numerical study on cracking and its effect on chloride transport in concrete subjected to external load[J]. Construction and Building Materials, 2022, 325:126797.
- [31] ZHAO K Y, QIAO Y, ZHANG P, et al. Experimental and numerical study on chloride transport in cement mortar during drying process[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258:119655.