DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.02.013 文章编号:1671-2579(2025)02-0118-08

饱和混凝土结构裂缝区氯离子扩散模型研究

彭建新[1],周鹏程[1],程小康[1],周亚栋[2]
(1.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114;2.中铁大桥局集团有限公司
桥梁智能与绿色建造全国重点实验室,湖北 武汉 430034)

摘要:为准确表征裂缝加速两侧混凝土氯离子传输的行为,该文提出了裂缝有效影响距离的概念,在修正等效介质模型中将裂缝孔隙按垂直于裂缝面的距离非均匀分配,基于通量守恒的原则,建立了混凝土裂缝区域的氯离子扩散系数表达式。结合已有试验数据,验证了该文建立的修正等效氯离子扩散模型的适用性。最后,讨论了裂缝非均匀加速两侧混凝土氯离子传输的特性,以及裂缝间距和数量对氯离子传输的影响。结果表明:采用修正等效氯离子扩散模型得到的结果与试验结果吻合较好。参数研究发现,随着垂直于裂缝面距离的增加,氯离子含量不断降低,同一深度裂缝有效影响距离,边缘氯离子含量仅为裂缝中心点处的19%;裂缝数量对于氯离子扩散有一定的影响,同样距离下裂缝3 mm、6 mm处,多裂缝区域氯离子含量较单一裂缝处最大提升量为2%和17%,随着裂缝数量的增多,氯离子扩散能力先迅速增强后趋于平缓;裂缝间距对混凝土多裂缝区域的影响显著,随着裂缝间距的增加,多裂缝区域氯离子整体含量迅速下降,尤其是中心区域下降最为明显。

关键词:桥梁工程;开裂混凝土;有效影响距离;氯离子传输
中图分类号:U448 **文献标志码**:A

Study on Chloride Ion Diffusion Model in Crack Zones of Saturated Concrete Structure

PENG Jianxin[1], ZHOU Pengcheng[1], CHENG Xiaokang[1], ZHOU Yadong[2]
(1. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114,China;
2.State Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, China Railway Major Bridge
Engineering Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430034, China)

Abstract: In order to accurately characterize the behavior of cracks in accelerating chloride ion transport on both sides of the concrete, the concept of effective influence distance of cracks was proposed, and the crack pores were non-uniformly distributed according to the distance perpendicular to the crack surface in the modified equivalent medium model. The expression of chloride ion diffusion coefficient in crack zones of concrete was established based on the principle of flux conservation. Based on the existing experimental data, the applicability of the modified equivalent chloride ion diffusion model established in this paper was verified. Finally, the characteristics of non-uniform acceleration of chloride ion transport on both sides of concrete by cracks were discussed, and the influence of crack spacing and number on chloride ion transport was explored. It finds that the results obtained by the modified equivalent chloride ion diffusion model are in good agreement with the experimental data. The parametric studies show that with the increase in the distance perpendicular to the crack surface, the chloride ion content continues to decrease, and the chloride ion content on both sides is only 19% of that at the crack center point at the same depth of effective influence distance of cracks. The number of cracks has a certain influence on chloride ion diffusion, and the maximum increase in chloride ion content in multi-crack areas is 2% and 17% compared with that of single cracks. In addition, with the increase in the number of cracks, the diffusion capacity of chloride ions first increases rapidly and then flattens. The crack spacing has a significant effect on the multi-crack area of concrete, and with the increase in crack spacing,

收稿日期:2024-06-30(修改稿)
基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078056);湖北省自然科学基金资助项目(编号:2022CFB558);湖南省研究生科研创新重点项目(编号:CX20220853)
作者简介:彭建新,男,博士,教授.E-mail:jianxinpeng@csust.edu.cn

the overall chloride ion content in the multi-crack area decreases rapidly, and the decrease is the most obvious in the central area.

Keywords: bridge engineering; cracked concrete; effective influence distance; chloride ion transport

0　引言

长期处于临海环境下，氯离子易侵蚀到混凝土内部，造成钢筋、预应力筋锈蚀和混凝土锈胀开裂等耐久性问题[1-4]。同时，在环境、荷载等多种因素作用下服役混凝土结构常常处于带细微裂缝工作的状态，裂缝的出现破坏了混凝土间的完整性，同时也缩短了Cl^-的传输路径。随着结构服役时间的增加，裂缝的数量不断增加，宽度也不断扩展，为氯离子的侵蚀提供了更便捷的通道，使其进一步加速达到钢筋、预应力筋表面，虽暂时不影响结构正常服役，但长期以往势必影响结构的耐久性和寿命[5-9]。因此，有必要开展混凝土裂缝区氯离子传输机理研究，了解开裂损伤区域混凝土中氯离子侵蚀特性，进而预测钢筋混凝土结构使用寿命，可为该类结构在氯盐环境下耐久性分析提供参考。

国内外学者研究发现，裂缝区域氯离子传输主要与裂缝形态参数，如宽度、深度、数量以及外界环境等相关，与结构本身材质关系不大[10-12]。关于裂缝形态参数对氯离子传输的影响，学者们进行了大量研究，张菊辉等[13]研究了裂缝深度和宽度对混凝土中氯离子扩散系数的影响，发现裂缝宽度是主要影响因素，和氯离子扩散系数存在指数关系，随着裂缝宽度和深度的增加，氯离子含量与扩散深度会提高；陆春华等[14]通过对开裂状态混凝土梁进行氯离子干湿交替循环试验，提出了带裂缝混凝土的“等效氯离子扩散系数”，并分析了氯离子的侵蚀特性；Wang等[15]通过将混凝土试件产生不同程度开裂，进而量化裂缝的几何参数，提出了有效裂缝宽度和有效裂缝密度与氯离子扩散的关系；陆文攀等[16]通过对试件加轴压产生裂缝，用比裂缝面积来衡量裂缝的扩展，研究了荷载损伤后氯离子的侵蚀特征；Konin等[17]发现，氯离子含量会随着弯曲载荷产生的微裂纹密度增加而增加，裂缝密度对氯离子传输有很大的影响；Peng等[18]将带裂缝混凝土定义为五相材料，建立非均质混凝土氯离子侵蚀的中尺度损伤模型，并验证了其有效性。裂缝区域氯离子扩散系数与裂缝宽度还存在上下限的关系，Takewaka等[19]研究发现裂缝宽度不超过0.05 mm时，氯离子扩散系数与完好混凝土中的等同；为0.05～0.10 mm时，扩散系数提升至10倍；裂缝宽度超过0.10 mm时，氯离子扩散系数迅速增加直至达到相同环境下在溶液中的扩散系数，相较于完好混凝土，氯离子扩散在裂缝处更为复杂。氯盐侵蚀引起钢筋锈蚀混凝土结构劣化，大大降低结构的服役时间。为此，Kwon等[20]、Audenaer等[21]分别通过蒙特卡洛概率框架和有限元模拟预测了开裂混凝土和完好混凝土的使用寿命。在开裂混凝土氯离子传输方面，取得了丰硕的研究成果，主要研究了单一裂缝影响下氯离子传输规律，对裂缝宽度、深度等参数进行了敏感性分析，构建了关于开裂混凝土裂缝宽度的等效氯离子扩散系数模型，并对开裂混凝土结构使用寿命进行了预测。但是，这些研究少有考虑对氯离子传输具有重要影响的其他参数，如裂缝间距、密度等，而在实际结构中裂缝不是单一出现的，往往伴随着多条不同宽度、形态的裂缝；并且多裂缝状态下采用等效氯离子扩散系数模型来求解的精度不高，不能运用到实际工程中。因此，有必要建立适用于多裂缝区域的氯离子扩散模型，分析多条裂缝状态下加速氯离子传输行为的机理。

基于现有研究成果，本文首先提出裂缝加速两侧混凝土氯离子传输有效影响距离的概念，推导单一裂缝状态下考虑裂缝有效影响距离的氯离子扩散方程。再结合通量守恒的原则，采用线性叠加方式得到多裂缝区域混凝土氯离子扩散系数。然后对比分析已有试验数据与本文扩散模型计算结果，验证了修正的氯离子扩散系数模型的适用性。最后，分析了裂缝数量、间距等参数对混凝土中氯离子传输的影响。

1　多裂缝混凝土内氯离子扩散模型

开裂混凝土中的氯离子传输较完好混凝土中的更为复杂，文献[22-24]中裂缝区域氯离子传输试验结果表明：对于开裂混凝土中氯离子的传输，实际上是个二维过程。为了简化计算，Djerbi等[25]采用等效介质模型将裂缝看作混凝土孔隙的一部分，平均分散到混凝土中，利用等效表观扩散系数来计算氯离子在带裂缝混凝土中的扩散，公式如下：

$$D_w=\frac{A_{cr}D_{cr}+AD_0}{A_{cr}+A} \tag{1}$$

式中：D_w为等效氯离子扩散系数；A_{cr}为混凝土开裂区域的面积；A为混凝土完好区域的面积；D_{cr}为裂缝处氯离子扩散系数；D_0为完好混凝土氯离子扩散系数。

为了描述裂缝间距和数量对于等效氯离子扩散系数的影响，将式(1)进行变换得到下式：

$$D_w=D_0+\frac{w}{s}D_{cr} \tag{2}$$

式中：w为裂缝宽度；s为裂缝间距。

上述式中，裂缝附近区域混凝土氯离子扩散系数被看作一个恒定值，然而在多数情况下，裂缝两侧混凝土氯离子扩散系数并不是恒定的，它随着垂直于裂缝开展面的距离的增大而递减，即距离裂缝处越近，对应位置氯离子浓度就越高，氯离子扩散系数也就越大。等效介质模型将裂缝作为孔隙平均分配到混凝土中，裂缝两侧混凝土氯离子扩散系数取固定值，对于裂缝局部区域氯离子非均匀传输不能很好地描述。为此，本文建立修正等效介质模型，将裂缝看作孔隙按照一定的关系分配到混凝土中，如图1所示。

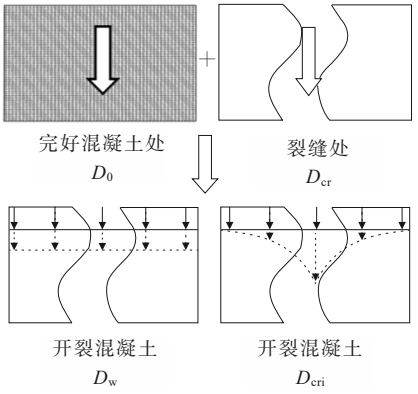


图1 修正等效扩散模型

Figure 1 Modified equivalent diffusion model

为了尽可能满足实际裂缝区域氯离子扩散情况，作出以下假设：

(1) 裂缝对于两侧混凝土加速效应在有限的距离内发生，本文称为裂缝有效影响距离l_w，在影响范围内，氯离子扩散系数为D_{cri}。

(2) 将裂缝处氯离子传输看作一维传输，在满足通量守恒的前提下裂缝附近混凝土氯离子扩散系数与距裂缝垂直距离满足二次项关系。

(3) 多裂缝区域混凝土氯离子扩散系数按照线性叠加的形式求解。

可以得到以下关系：

$$(D_w-D_0)l_w=\int_0^{l_w}D_a(l)\mathrm{d}l \tag{3}$$

满足式(3)的前提下，某一裂缝影响距离l_w内D_{cri}与D_w、D_0的关系式如下：

$$D_a(x)=\frac{3(D_w-D_0)}{l_w^2}(l-l_w)^2 \tag{4}$$

$$D_{cri}=D_0+D_a \tag{5}$$

式中：D_a为考虑裂缝影响的分配氯离子扩散系数，满足二次项关系。

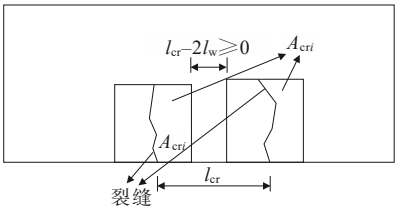
Kwon等[20]对服役多年的钢筋混凝土结构进行现场试验，提出了裂缝区等效表观氯离子扩散系数D_w与完好混凝土氯离子扩散系数D_0间存在劣化函数$f(w)$的关系，并总结试验结果，得到了$f(w)$的二次函数表达式：

$$D_w=(31.61w^2+4.73w+1)\cdot D_0,\ w\geqslant 0.1\ \mathrm{mm} \tag{6}$$

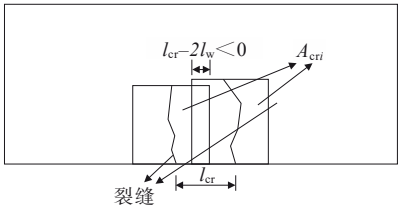
对于裂缝处氯离子扩散系数D_{cr}的取值，Djerbi等[25]进行了研究，建立了D_{cr}关于裂缝宽度w的表达式，具体如下：

$$\begin{aligned} &D_{cr}=2\times10^{-11}w-4\times10^{-10} && 30\ \mu\mathrm{m}\leqslant w\leqslant 80\ \mu\mathrm{m}\\ &D_{cr}=14\times10^{-10} && w>80\ \mu\mathrm{m}\end{aligned} \tag{7}$$

基于裂缝有效影响距离，可推导出多裂缝情况下扩散系数修正公式(图2)。



(a) 未出现耦合区域



(b) 出现耦合区域

图2 多裂缝交互情况

Figure 2 Interaction of multiple cracks

当两条裂缝间距足够远时，即如图2(a)所示，满足$2l_w\leqslant l_{cr}$，裂缝之间不存在交互影响，可以按照单一裂缝状态进行分析，用式(5)来计算。

当裂缝间距如图2(b)所示，$2l_w > l_{cr}$，此时两裂缝中间混凝土存在耦合效应，氯离子浓度相比单一裂缝状态下有所增大。考虑耦合区域受多裂缝影响，基于通量守恒的原则，推导出耦合区域氯离子扩散系数线性叠加公式：

$$D_{cri} = D_0 + \sum_{i=1}^{n} D_{a,i} \tag{8}$$

式中：n为裂缝数目。

本文将式(6)得到的等效氯离子扩散系数值用作后续计算，再采用式(4)和式(8)计算修正后的氯离子扩散系数值。

利用Fick第二定律来求解裂缝两侧混凝土结构中氯离子扩散，方程为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{cri}\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\ (0 < l < l_w) \tag{9}$$

式中：C为氯离子浓度；D_{cri}为氯离子扩散系数(混凝土裂缝影响区域内)；l为混凝土距离裂缝开展面的垂直距离；t为时间。

当满足初始条件：$C(x=0, t>0)=C_s$，$C(x>0, t=0)=C_0$，得到的解为：

$$C(x,t) = C_0 + (C_s - C_0)\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cri}t}}\right)\right] \tag{10}$$

式中：erf为补偿误差函数；C_s为表面氯离子浓度。

在已知混凝土裂缝处等效氯离子扩散系数D_{cri}与表面氯离子浓度C_s的条件下，可以使用Matlab来进行计算，得到一定时间t后裂缝区域氯离子含量。

2　氯离子扩散模型验证

2.1　裂缝有效影响距离l_w的确定

模型中裂缝影响距离l_w取值是准确预测氯离子传输的关键，已有学者对其进行过分析，但并没有得到l_w定量取值的方法。张希瑾等[26]通过无损的方式制作了单裂缝以及双裂缝水泥砂浆试件，进行了氯离子侵蚀试验，发现垂直于裂缝开展方向10～20 mm内，氯离子浓度及侵蚀深度逐渐趋近于完好混凝土，双裂缝试件随着裂缝间距的减小，两裂缝中间氯离子侵蚀深度不断增大甚至大于裂缝附近。金浏等[27]建立了裂缝中氯离子扩散系数与裂缝宽度间的关系，并利用第三方试验数据与数值结果对比验证了公式的合理性，发现试验数据与数值结果都在垂直于裂缝开展方向20 mm内达到稳定，不再受裂缝的影响。

考虑到裂缝中氯离子扩散是个二维的过程，l_w等同于垂直于裂缝方向的扩散深度，与裂缝宽度、扩散系数和时间等参数密切相关。考虑众多参数无疑会导致求解的复杂性，为简化过程，本文l_w首先取定值10 mm、15 mm和20 mm进行计算，观察3个取值得到的结果能否与已有试验数据吻合良好，后续分析采用最优的l_w进行。

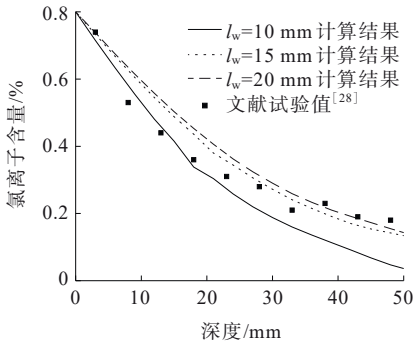
为此，选用延永东等[28]的试验作为对象分析。试件尺寸为100 mm的立方体，裂缝宽度0.3 mm，深度40 mm，具体参数见表1。

表1　试验得到的参数

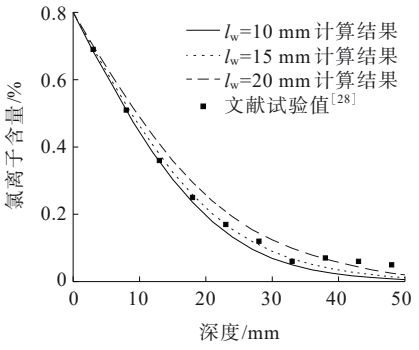
Table 1　Parameters obtained from test

C_s/%	w/mm	周期/d	D_0/(10^{-11} m^2·s^{-1})	D_{cr}/(10^{-10}·m^2·s^{-1})
$0.8[1-\exp(-0.025t)]$	0.2	160	$4.0[28/(28+t)]^{0.3}$	14

通过本模型计算出的结果和试验值对比，分析裂缝有效影响宽度取值10 mm、15 mm和20 mm对氯离子扩散的影响，结果如图3所示。



(a) 距离裂缝15 mm



(b) 距离裂缝30 mm

图3　裂缝附近混凝土内氯离子含量

Figure 3　Chloride ion content in concrete near cracks

由图3(a)可以看出:距离裂缝15 mm处混凝土表层计算出的氯离子含量值同试验值都吻合,在浅层l_w取10 mm得出的结果和试验值比较吻合,在较深处取15 mm比较合理。图3(b)为距离裂缝30 mm处混凝土氯离子含量数据,由图3(b)可以看出:① 当l_w取15 mm时,计算结果和试验值最为吻合;② 随着l_w取值的增大,氯离子含量随着深度的增加会呈先增大后趋于一致的现象,这是因为随着l_w的增大,裂缝两侧混凝土同一位置的氯离子扩散系数会增大。通过对比计算结果与已有试验结果确定l_w的取值,后续研究本文都采用l_w=15 mm进行。

2.2 扩散模型验证

为了验证式(8)在氯离子侵蚀混凝土多裂缝区域的适用性,以Mu等[29]试验中的试件为对象进行分析。文献中通过插入小钢片制造了固定宽度与深度的无损裂缝,在盐溶液中浸泡90 d后定量研究裂缝数量与间距对氯离子扩散的影响。裂缝的间距实测数据为0.39 mm,标准差为0.07 mm,裂缝数目从0到5,$D_0=2.66\times10^{-12}$ m^2/s。图4给出了计算结果与试验数据的对比情况。其中,M1C1代表试验中有1道裂缝的试件所测得的氯离子含量,M1C1-JS代表有1道裂缝的试件采用本文氯离子扩散模型计算得到的氯离子含量。

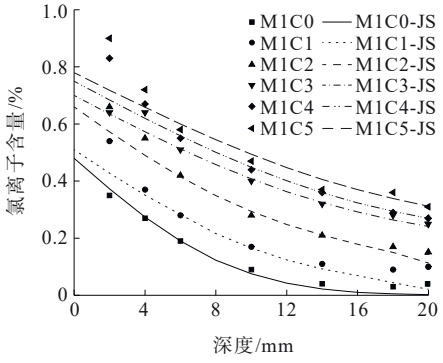


图4 不同裂缝数目下混凝土内氯离子含量

Figure 4 Chloride ion content in concrete with different numbers of crack

计算中表面氯离子浓度采用了文献[29]拟合出的数据,氯离子扩散系数则按照式(6)与式(8)计算得出。考虑到文献[29]并未给出具体的测量位置,且裂缝处混凝土氯离子含量实际测量是采用钻孔取粉的方法,取得一定范围内的含量平均值,因此,采用两条裂缝中间混凝土处氯离子含量作为计算结果。从图4可以看出:采用本文提出的模型计算结果和试验结果吻合良好。试件在经过90 d浸泡后氯离子含量与表面氯离子浓度随着裂缝数目的增加而增加,可见裂缝数对混凝土中氯离子扩散和混凝土表面氯离子浓度的影响显著。

3 多裂缝区域氯离子扩散参数研究

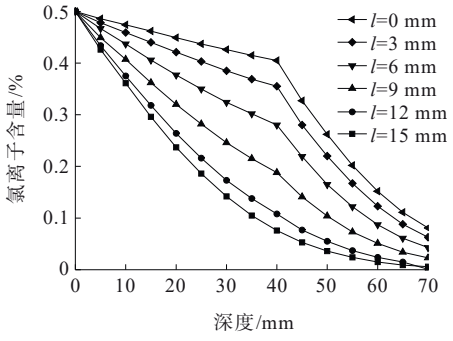
在上文中,建立了混凝土多裂缝区域氯离子扩散模型,并以试验数据验证了模型的适用性。设混凝土结构出现了裂缝,裂缝宽度为0.2 mm,深度40 mm,混凝土表面氯离子浓度为混凝土质量分数的0.5%,完好混凝土氯离子扩散系数$D_0=2.5\times10^{-11}$ m^2/s,结构服役期为1年,其间始终处于饱和状态。用此算例对多裂缝状态下氯离子传输参数进行分析。

3.1 裂缝数量

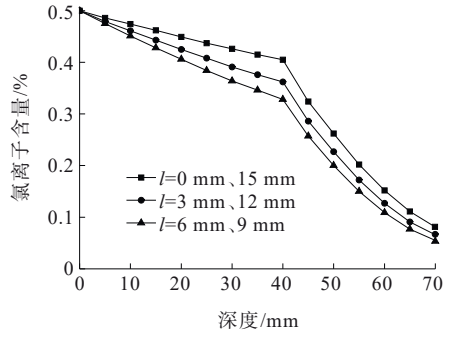
考虑到l_w=15 mm的影响范围小,假定结构存在两道裂缝,间距l_{cr}为15 mm,为了研究裂缝数目对混凝土氯离子传输的影响,任选其中一道裂缝,在其两侧隔3 mm取一个测量点,直到距离裂缝15 mm处。图5给出了每个点的氯离子浓度分布情况。图5(a)中测点仅受单一裂缝的影响,在裂缝中心附近得到的氯离子含量与扩散深度最大,深度为40 mm处,计算得到的氯离子含量为0.405%,随着与裂缝面垂直距离的增加,氯离子含量不断减小,在垂直于裂缝面6 mm、12 mm、15 mm处氯离子含量分别为0.280%、0.108%和0.076%,含量比值分别为69%、27%和19%,该趋势充分体现了裂缝对两侧混凝土氯离子传输的非均匀加速特性。图5(b)给出了受多裂缝影响区域混凝土氯离子含量随着与裂缝面垂直距离变化的曲线图,对比图5(a)相同距离位置点的氯离子含量,可以明显看到多裂缝区域氯离子含量较单一裂缝区域有很大的提升。在深度40 mm,距离裂缝面3 mm处,多裂缝影响区域氯离子含量较单一裂缝影响区域提升了2%,而在距离裂缝面6 mm处提升了17%。

3.2 裂缝间距

为了得到裂缝间距对氯离子含量的影响,分别取裂缝间距为10 mm、15 mm、20 mm和30 mm进行研究,得到混凝土两裂缝中间区域氯离子含量如图6所示。图6(a)给出了多裂缝区域中心点氯离子含量随裂缝间距的变化,随着裂缝间距l_{cr}取值的增大,混凝土两裂缝中间区域上氯离子含量不断降低,且降



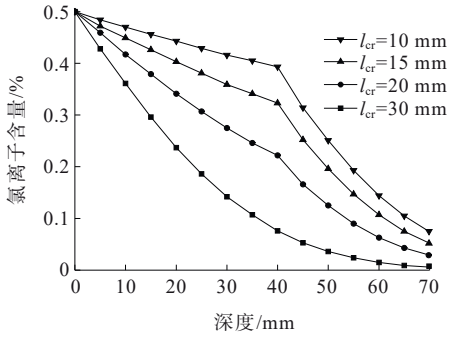
(a) 单一裂缝影响侧混凝土氯离子含量



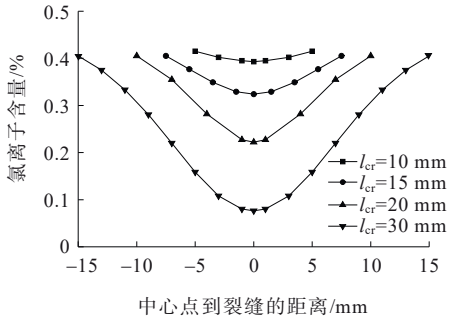
(b) 多裂缝影响侧混凝土氯离子含量

图5　裂缝非均匀加速效应下氯离子含量

Figure 5　Chloride ion content under non-uniform acceleration effect of cracks



(a) 多裂缝区域中间点氯离子含量



(b) 多裂缝区域氯离子分布

图6　不同裂缝间距下混凝土氯离子含量

Figure 6　Chloride ion content in concrete with different crack spacing

低速度不断增大,最后趋于平缓。在混凝土深度40 mm处,不同裂缝间距中心点氯离子含量范围为0.08%～0.40%,具有较大的差异,且氯离子侵蚀深度随着裂缝间距的变小也随之增大。图6(b)描绘了混凝土深度为40 mm时,多裂缝区域氯离子含量随着裂缝间距的增大,呈现下降的趋势,下降速度最大的在多裂缝区域中心点。由此可见,氯离子含量和分布与多裂缝间距密切相关。不同裂缝间距对于氯离子扩散深度有很大的影响。

4　结论

通过提出裂缝有效影响距离的概念,基于裂缝局部二维扩散的特点,建立了裂缝区域氯离子扩散系数与裂缝有效影响距离的二次项关系,得到了混凝土裂缝区修正氯离子扩散模型。对比分析已有试验数据与本文扩散模型计算结果,验证了本文修正的氯离子扩散系数模型的适用性,得到以下结论:

(1) 采用二次项关系来描述氯离子扩散系数与裂缝距离的关系具有一定的可靠性,修正氯离子扩散模型计算结果和已有试验结果吻合良好,随着垂直于裂缝面距离的增加,氯离子含量逐渐减少,这表明裂缝对两侧混凝土氯离子传输的非均匀加速特性,可更加精确地研究裂缝两侧混凝土中的氯离子分布。

(2) 裂缝数目对氯离子传输具有很大影响,多裂缝区域氯离子含量较单一裂缝区域有很大提升,同样距离裂缝开展面3 mm、6 mm的点,多裂缝区域氯离子含量较单一裂缝处最大提升量为2%和17%;裂缝间距对于氯离子的扩散有显著影响,随着裂缝间距的增大,混凝土两裂缝中间区域上氯离子含量不断降低,且降低速度先不断增大,后趋于平缓,达到完好混凝土氯离子含量。

(3) 裂缝有效影响距离的取值对裂缝区域氯离子扩散行为影响很大。模型中,为了简便计算,裂缝有效影响距离取为恒定值,对计算的精确度有一定影响。因此,下一步研究应揭示裂缝有效影响距离与时间、扩散系数等参数的定量关系。

参考文献:

References:

[1]　邹向农,龙俊贤,陈宇翔,等.腐蚀预应力混凝土桥梁抗力

退化预测方法[J].中外公路,2019,39(3):84-89.
ZOU Xiangnong, LONG Junxian, CHEN Yuxiang, et al. Prediction method of resistance degradation for corroded prestressed concrete bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(3):84-89.

[2] 付宏渊,陈长睿,陈昌富,等.Cl^-环境下锚杆腐蚀过程及锚固边坡稳定性分析[J].中外公路,2021,41(6):1-5.
FU Hongyuan, CHEN Changrui, CHEN Changfu, et al. Analysis of anchor rod corrosion process and anchored slope stability in Cl^- environment[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(6):1-5.

[3] 曾天宝,陈宏,黄筱淇,等.钢绞线非均匀锈蚀下混凝土胀裂细观数值模拟[J].中外公路,2024,44(2):174-181.
ZENG Tianbao, CHEN Hong, HUANG Xiaoqi, et al. Mesoscopic numerical simulation of concrete cracking caused by nonuniform corrosion of strands [J].Journal of China & Foreign Highway,2024,44(2):174-181.

[4] 蔺鹏臻,王雲一.混凝土桥梁受盐碱地中氯离子侵蚀的耐久性研究[J].桥梁建设,2022,52(6):73-78.
LIN Pengzhen, WANG Yunyi. Durability of concrete bridge exposed to chloride ion erosion in saline alkali soil [J].Bridge Construction, 2022, 52(6): 73-78.

[5] 杜修力,金浏,张仁波.力学荷载对混凝土中氯离子渗透扩散行为影响述评[J].建筑结构学报,2016,37(1):107-125.
DU Xiuli, JIN Liu, ZHANG Renbo. Review on effect of external mechanical loadings on chloride penetration and diffusion into concrete[J]. Journal of Building Structures, 2016,37(1):107-125.

[6] 高子瑞,李淑娥,金明东,等.裂缝混凝土中修正的氯离子运移模型研究[J].中外公路,2016,36(5):230-234.
GAO Zirui, LI Shue, JIN Mingdong, et al. Study on modified chloride ion transport model in fractured concrete [J].Journal of China & Foreign Highway,2016,36(5):230-234.

[7] 张红光,王曙光,刘伟庆,等.开裂混凝土内氯离子扩散机理及数值模拟研究[J].混凝土,2014(9):19-25.
ZHANG Hongguang,WANG Shuguang,LIU Weiqing,et al. Study on the mechanism and numerical modeling of chloride ingress in cracked concrete[J]. Concrete, 2014(9): 19-25.

[8] 李强,陈志林,刘龙龙,等.炎热海洋环境下混凝土桥梁抗氯离子侵蚀耐久性研究[J].公路交通科技,2023,40(5):72-77.
LI Qiang, CHEN Zhilin, LIU Longlong. Study on durability of concrete bridge against chloride ion erosion in hot marine environment[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(5): 72-77.

[9] 张爱丽,郭颜凤,孙红.腐蚀环境下外加剂对混凝土耐久性的影响[J].中外公路,2022,42(6):202-205.
ZHANG Aili, GUO Yanfeng, SUN Hong. Influence of admixtures on durability of concrete in corrosive environment[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(6):202-205.

[10] 延永东,姚昌建,刘荣桂,等.氯盐环境下开裂混凝土耐久性研究进展[J].建筑科学与工程学报,2015,32(4):21-30.
YAN Yongdong, YAO Changjian, LIU Ronggui, et al. Research progress on durability of cracked concrete under chloride environment[J].Journal of Architecture and Civil Engineering,2015,32(4):21-30.

[11] 穆松,刘建忠.基于混凝土裂缝特征的氯离子传输性质研究进展[J].硅酸盐学报,2015,43(6):829-838.
MU Song, LIU Jianzhong. Review of chloride transport properties in concrete featured with different cracking characteristics[J].Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015,43(6):829-838.

[12] 崔海军.聚丙烯纤维对海砂混凝土的耐久性试验研究[J].中外公路,2022,42(4):203-205.
CUI Haijun. Experimental study on durability of polypropylene fiber to sea sand concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(4):203-205.

[13] 张菊辉,方成.氯盐侵蚀下钢筋混凝土结构寿命的预测研究进展[J].材料科学与工程学报,2019,37(5):848-854,859.
ZHANG Juhui, FANG Cheng. Research progress on service life prediction of reinforced concrete structures under chloride attack[J].Journal of Materials Science and Engineering,2019,37(5):848-854,859.

[14] 陆春华,刘荣桂,崔钊玮,等.干湿交替作用下受弯开裂钢筋混凝土梁内氯离子侵蚀特性[J].土木工程学报,2014,47(12):82-90.
LU Chunhua, LIU Ronggui, CUI Zhaowei, et al. Study on chloride penetration into flexural cracked reinforced concrete beams subjected to drying-wetting cycles[J]. China Civil Engineering Journal,2014,47(12):82-90.

[15] WANG H L, DAI J G, SUN X Y, et al. Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration [J]. Construction and Building Materials, 2016, 107: 216-225.

[16] 陆文攀,赵铁军,马志鸣,等.荷载损伤对混凝土微裂缝和氯离子侵蚀的影响研究[J].混凝土,2015(6):54-57.
LU Wenpan,ZHAO Tiejun,MA Zhiming,et al.Influence of higher stress on chloride ion corrosion in concrete[J]. Concrete,2015(6):54-57.

[17] KONIN A, FRANÇOIS R, ARLIGUIE G. Penetration of chlorides in relation to the microcracking state into reinforced ordinary and high strength concrete[J]. Materials and Structures,1998,31(5):310-316.

[18] 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.

[19] TAKEWAKA K, YAMAGUCHI T, MAEDA S. Simulation model for deterioration of concrete structures due to

chloride attack[J]. Journal of Advanced Concrete Technology,2003,1(2):139-146.

[20] KWON S J,NA U J,PARK S S,et al.Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion[J]. Structural Safety, 2009, 31(1):75-83.

[21] AUDENAERT K, MARSAVINA L, DE SCHUTTER G. Influence of cracks on the service life of concrete structures in a marine environment[J]. Key Engineering Materials,2008,399:153-160.

[22] 董荣珍,高印,卫军,等.干湿循环作用下混凝土裂缝区域氯离子的传输状态[J].硅酸盐通报,2017,36(4):1113-1119.
DONG Rongzhen,GAO Yin,WEI Jun,et al.Transport state of chloride ion in concrete crack area under dry-wet cycle [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(4): 1113-1119.

[23] 张菊辉,刘颖慧,时哲敏.氯离子在开裂混凝土中的扩散特性研究[J].建筑材料学报,2018,21(2):299-303.
ZHANG Juhui, LIU Yinghui, SHI Zhemin. Diffusion property of chloride in cracked concrete[J]. Journal of Building Materials,2018,21(2):299-303.

[24] 胡大琳,陈定市,张立兴,等.饱水混凝土氯离子侵蚀数值试验随机细观分析[J].长安大学学报(自然科学版),2017,37(6):38-46.
HU Dalin, CHEN Dingshi, ZHANG Lixing, et al. Mesoscopic and stochastic analysis of chloride ion erosion in saturated concrete by numerical tests[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37 (6):38-46.

[25] DJERBI A, BONNET S, KHELIDJ A, et al. Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete[J]. Cement and Concrete Research,2008,38(6):877-883.

[26] 张希瑾,田稳苓,王浩宇,等.带裂缝混凝土氯离子扩散作用试验研究及数值模拟[J].土木建筑与环境工程,2017,39(2):35-42.
ZHANG Xijin, TIAN Wenling, WANG Haoyu, et al. Experimental analysis and numerical simulation of chloride ion diffusion in concrete with cracks[J].Journal of Civil,Architectural & Environmental Engineering,2017,39 (2):35-42.

[27] 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.

[28] 延永东,金伟良,王海龙.饱和状态下开裂混凝土内的氯离子输运[J].浙江大学学报(工学版),2011,45(12):2127-2133.
YAN Yongdong, JIN Weiliang, WANG Hailong. Chloride ingression in cracked concrete under saturated state[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011,45(12):2127-2133.

[29] MU S, DE SCHUTTER G, MA B G. Non-steady state chloride diffusion in concrete with different crack densities [J].Materials and Structures,2013,46(1):123-133.