

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023072723101978

文章编号:1674-599X(2023)05-0010-07

引用格式:彭建新,程小康,阳逸鸣.干湿交替作用下RC结构中氯离子传输数值分析[J].交通科学与工程,2023,39(5):10-16.

Citation: PENG Jianxin, CHENG Xiaokang, YANG Yiming. Numerical analysis of chloride ion transport in RC structure under drying-wetting cycles[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(5): 10-16.

干湿交替作用下RC结构中氯离子传输数值分析

彭建新¹,程小康¹,阳逸鸣²

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;

2.湖南城市学院 土木工程学院,湖南 益阳 413000)

摘要:为探究干湿交替作用对钢筋混凝土结构中氯离子传输规律的影响。考虑钢筋的阻挡作用,建立干湿交替作用下钢筋混凝土结构的氯离子对流传输模型,通过试验验证该模型的适用性,并基于二维细观混凝土模型进行参数分析。研究表明:钢筋的阻挡作用会导致氯离子在混凝土表面积聚,且这种现象随着干湿交替时间的增加而加剧。在细观模型中,随着氯离子在混凝土中的积累,氯离子含量的峰值和位置均出现在表层。与普通混凝土相比,钢筋混凝土结构的氯离子含量较高。氯离子含量与钢筋直径的增加呈正相关。干湿时间比的增加,加速了氯离子在混凝土内的传输,初始溶液饱和度越低,氯离子含量越高,且初始饱和度为0.1时,氯离子含量峰值达到0.605%。

关键词:钢筋混凝土;干湿交替;氯离子对流扩散;细观模型

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Numerical analysis of chloride ion transport in RC structure under drying-wetting cycles

PENG Jianxin¹, CHENG Xiaokang¹, YANG Yiming²

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

2. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: In order to obtain the chloride ion transport law in reinforced concrete structures under dry and wet alternating effects. Considering the blocking effect of steel reinforcement, a model of chloride ion convective transport in reinforced concrete structures under dry-wet alternation is established, the applicability of the model is verified through experiments, and the parameters are analyzed based on two-dimensional meso-concrete model. The results show that the blocking effect of steel reinforcement causes chloride ions to accumulate on the surface of concrete and increase with the increase of dry-wet alternation time. In the mesoscopic model, with the accumulation of chloride ions in concrete, the peak value and location of chloride ion content appear in the surface layer. The chloride ion content was larger in reinforced concrete structures compared to plain concrete, and the chloride ion content was positively correlated with the increase in reinforcement diameter. The increase in the dry-to-wet time ratio accelerated the transport of chloride ions within the concrete, and the lower the initial solution saturation is, the higher the chloride ion content is, When the initial saturation is 0.1, the peak chloride ion content is 0.605%.

Key words: reinforced concrete; drying-wetting cycles; convective diffusion of chloride ions; mesoscopic model

干湿交替环境下临海钢筋混凝土结构的氯化物扩散问题是许多学者研究混凝土耐久性的重要

课题之一^[1-6]。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耐久性降低的主要原

收稿日期:2023-07-27

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

作者简介:彭建新(1978—),男,长沙理工大学教授,博士生导师。E-mail: jianxin.peng@qq.com

因^[7]。近年来,学者们通过试验对钢筋混凝土中氯离子扩散进行了研究。徐现正等^[8]对不同干湿比作用下的钢筋混凝土结构进行了氯离子扩散试验,发现干湿时间比对氯离子在混凝土内扩散影响较大。YU等^[9]测试了海口湾和大连湾的氯离子含量,发现钢筋的锈蚀程度除了与环境相关外,还与氯离子含量存在相关性。PEPENAR等^[10]对两座分别运营了14 a和22 a的工业建筑中的钢筋混凝土结构的氯离子含量进行了测试,发现钢筋的点蚀电位随氯离子含量的对数下降。由于进行试验的成本较高且耗费时间较长,因此许多学者采用数值模拟进行氯离子传输研究。CAO等^[11]基于FICK第二定律,采用交替方向隐式方法对弯曲荷载和干湿交替下氯离子传输的对流-扩散方程进行了数值求解。CHEN等^[12]考虑荷载、饱和度、相对湿度和温度等因素,基于应力水平的等效函数,建立了在荷载作用下非饱和混凝土的氯离子扩散数值模型,并对其进行了分析。ZHANG等^[13]基于多孔介质理论和等效均质化,建立了应力作用下氯化物传输有效扩散变量系数模型,并对其进行数值分析。在这些研究中,未考虑干湿交替环境中钢筋对氯离子传输的影响。因此,为明确钢筋混凝土中的钢筋对干湿交替作用下在混凝土中氯离子传输规律的影响,本研究拟考虑钢筋阻挡效应,建立干湿交替作用下钢筋混凝土结构的氯离子对流传输模型,并通过试验验证该模型的适用性。基于二维细观混凝土模型,研究氯离子在非饱和混凝土细观尺度上的传输规律,并进行参数分析。

1 钢筋混凝土结构细观模型研究

1.1 氯离子对流扩散方程

氯离子对流扩散方程包含氯离子和水分扩散,其表达式为:

$$\frac{\partial C_{(x,t)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{cl} \frac{\partial C_{(x,t)}}{\partial x} + \frac{C_{(x,t)}}{s_{(x,t)}} D_{co} \frac{\partial s_{(x,t)}}{\partial x} \right] \quad (1)$$

式中: $C_{(x,t)}$ 为 t 时间内侵蚀深度为 x 时的氯离子含量; x 为侵蚀深度,mm; t 为侵蚀时间,s; $s_{(x,t)}$ 为 t 时间内侵蚀深度为 x 时的水分饱和度; D_{cl} 为混凝土中氯离子扩散系数, m^2/s ; D_{co} 为水分扩散系数, m^2/s 。

混凝土中氯离子扩散系数主要包括水泥浆体和界面过渡区中氯离子扩散系数,而骨料中氯离子扩散的影响可以忽略不计。其中,水泥浆体和界面过渡区的氯离子扩散系数分别用 D_{cp} 和 D_{itz} 表示,相

关计算方程式为式(2);水分扩散系数主要包括湿润状态下的水分扩散系数 $D_{co,w}$ 和干燥状态下的水分扩散系数 $D_{co,d}$,用方程式(3)进行表达^[14]。

$$\begin{cases} D_{cp} = \frac{2.14 \times 10^{-10} \varphi^{2.75}}{\varphi^{1.75} (3 - \varphi) + 14.44 (1 - \varphi)^{2.75}} \\ D_{itz} = D_{cp} \left(\frac{139.434}{d_{itz}} + 1 \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: φ 为水泥浆体基质的孔隙率,具体计算方式见文献^[15]; d_{itz} 为界面过渡区厚度, μm 。

$$\begin{cases} D_{co,w} = D_{co,w0} \left[0.025 + \frac{0.975}{1 + \left(\frac{1-s}{1-s_c} \right)^6} \right] \\ D_{co,d} = D_{co,d0} \exp(6s) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $D_{co,w0}$ 为完全干燥状态下的水分扩散系数, m^2/s ; $D_{co,d0}$ 为饱和混凝土的水分扩散系数, m^2/s ; s 为水泥浆体的水分饱和度; s_c 为 $D_{co,w0}/2=0.5$ 时的水分饱和度,其值取0.75~0.98。

1.2 钢筋的阻挡效应

钢筋前沿区域的氯离子含量较无钢筋混凝土同深度区域的氯离子含量大,在实际工程中钢筋的阻挡效应不可忽视^[16-17],针对这一情况,氯离子扩散系数应考虑钢筋相邻区域的影响,具体计算式为:

$$D_{cp(r)} = D_{cp} \left[2.629 \left(\frac{x_1}{d_r} \right) - 1.7175 \right] \quad (4)$$

式中: $D_{cp(r)}$ 受钢筋影响的水泥浆体氯离子扩散系数; x_1 为扩散方向距离钢筋的直线距离; d_r 为钢筋直径,mm; x_1 为扩散方向距离钢筋的直线距离,如图1所示,取16~20 mm。

同理,受钢筋影响的界面过渡区氯离子扩散系数 $D_{itz(r)}=D_{cp(r)}(139.434/d_{itz}+1)$ 。

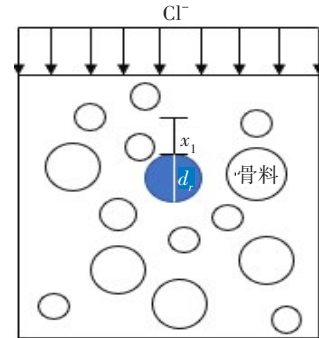


图1 钢筋前沿区域示意

Fig. 1 Schematic representation of the rebar front area

水泥浆体基质的氯离子扩散系数具有时间衰减性,其表达式为:

$$\begin{cases} D_{cp(t)} = D_{cp} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t_{ref} + t} \right)^m \\ D_{cp(r)(t)} = D_{cp(r)} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t_{ref} + t} \right)^m \end{cases} \quad (5)$$

式中： $D_{cp(t)}$ 和 $D_{cp(r)(t)}$ 分别为在考虑时间衰减性情况下不受钢筋影响的和受钢筋影响的水泥浆体基质的氯离子扩散系数， m^2/s ； t_{ref} 为养护龄期， d ； t 为侵蚀时间， s ； m 为时间衰减系数，本研究 m 取0.65^[1]。

根据式(5)，得到在考虑时间衰减性情况下受钢筋影响和不受钢筋影响的界面过渡区氯离子扩散系数。干湿交替作用下混凝土结构水分和氯离子的初始条件和边界条件分别见式(6)和式(7)。

1) 初始条件。

$$\begin{cases} s_{(x,0)} = s_1 \\ C_{(x,0)} = C_0 \end{cases} \quad (6)$$

2) 边界条件。

a) 湿润状态。

$$\begin{cases} s_{1(0,t)} = s_2 \\ C_{(0,t)} = C_s \end{cases} \quad (7)$$

b) 干燥状态。

$$\begin{cases} s_{2(0,t)} = s_3 \\ ng(D_{Cl} \cdot \nabla C + D_{co} \cdot \nabla s \cdot C)|_{(0,t)} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $s_{(x,0)}$ 为 $t = 0$ 时，混凝土内的水分饱和度； $C_{(x,0)}$ 为 $t = 0$ 时，混凝土氯离子浓度； $C_{(0,t)}$ 为 $x = 0$ 时混凝土氯离子浓度； $s_{1(0,t)}$ 和 $s_{2(0,t)}$ 分别为 $x = 0$ 时湿润和干燥状态下混凝土的水分饱和度； s_1 为初始状态下混凝土中的水分饱和度； C_0 为初始状态下混凝土的氯离子含量； C_s 为表面氯离子含量； s_2 为湿润状态下混凝土的表面水分饱和度； s_3 为干燥状态下混凝土的水分饱和度； ∇C 和 ∇s 分别为 $\partial^2 C_{(x,t)} / \partial^2 x$ 和 $\partial^2 S_{(x,t)} / \partial^2 x$ 。

2 模型的验证

2.1 模型参数

本研究采用文献[18]的氯离子侵蚀试验数据进行模型验证，试验试件尺寸为150 mm×150 mm×300 mm，内置4根直径为14 mm的HRB335纵筋，保护层厚度为25 mm，如图2所示。混凝土的配合比见表1。

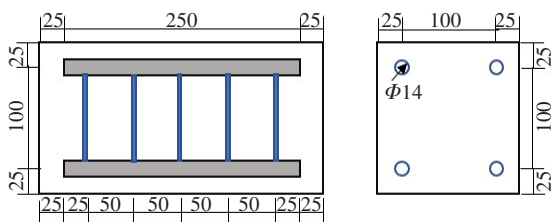


图2 试验梁模型(单位:mm)

Fig. 2 Experiment beam model(unit:mm)

表1 混凝土配合比

Table 1 Concrete mix proportion kg

	水	水泥	砂	石子
C25	188	384	640	1 189

通过无应力状态下钢筋混凝土跨中横截面的氯离子含量来表征试验模型中的氯离子传输规律，其中，箍筋的影响忽略不计^[19]。本研究选取试验梁跨中横截面，采用文献[1]的随机骨料生成方法，生成钢筋混凝土结构二维随机骨料模型，骨料界面过渡区厚度取30 μm，而水泥浆体基质采用1 mm×1 mm的自由三角形网格进行有限元分析，如图3所示。对于钢筋的影响区域，本研究 x_1 取20 mm。

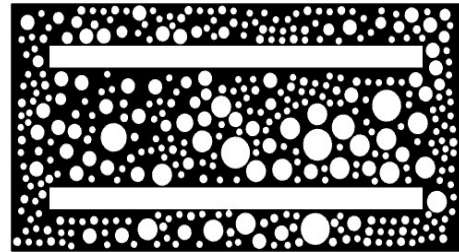


图3 试验梁有限元模型

Fig. 3 Finite element model of experiment beam

本模型中，相关参数的设置见表2。

表2 计算模型主要参数

Table 2 Main parameters of calculation model

参数名称	数值	文献
$D_{co,w0} / (m^2 \cdot s^{-1})$	4.05×10^{-11}	文献[20]
$D_{co,d0} / (m^2 \cdot s^{-1})$	1.4×10^{-10}	文献[20]
t_{ref} / d	28	-
φ	0.42	-
s_c	0.792	文献[21]
s_1	1	文献[21]
s_2	1	文献[21]
s_3	0.45	文献[21]
$C_s / \%$	0.3	文献[21]

2.2 模型验证

数值模拟结果与试验结果如图4所示。从图4可以看出，随着干湿循环时间的增加，氯离子含量逐渐累积。此外，在侵蚀深度为5 mm处，氯离子含量并没有明显下降，这是钢筋的阻挡效应所导致的，使得该区域的氯离子含量增加速度较为缓慢^[19]。同时，从图4还可以看出，氯离子含量的模拟曲线与实测数据吻

合较好,表明:本传输模型可以有效地描述干湿交替作用下钢筋混凝土结构的氯离子传输情况。

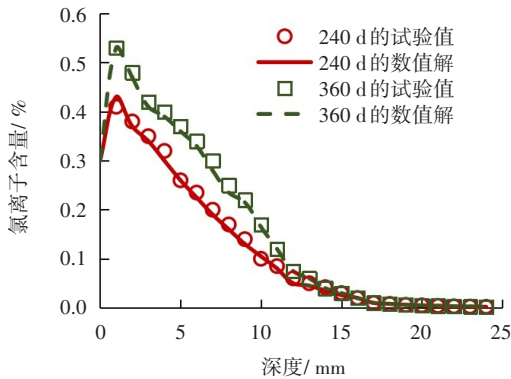


图4 氯离子含量的试验值与数值结果之间的比较

Fig. 4 Comparison between test values and numerical results for chloride concentration

2.3 细观状态下的氯离子传输讨论

基于本模型,可以模拟氯化物在不饱和混凝土中的运输情况。采用如图5所示的A-A、B-B和C-C三个截线进行氯离子含量和水分饱和度的随机性和不均匀性分析。

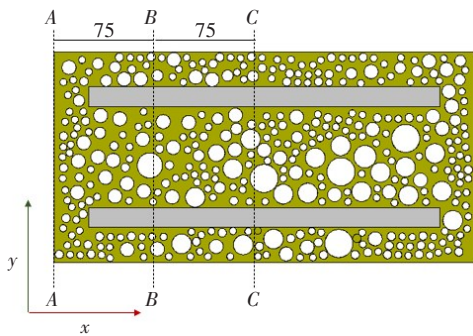


图5 钢筋混凝土细观模型(单位:mm)

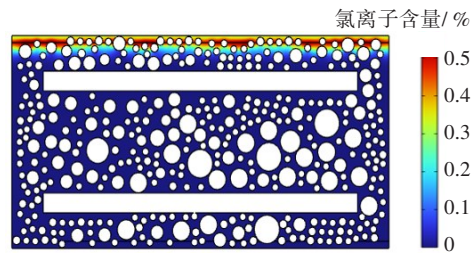
Fig. 5 Reinforced concrete fine view model(unit:mm)

以360 d的湿润和干燥状态的模拟结果为例,分析0~100 mm扩散深度的氯离子含量分布,如图6~7所示。从图6(a)可以看出,氯离子含量的峰值出现在表层。这与从宏观角度得到的计算结果是一致的。然而,由于骨料周围氯离子的局部积累,相同深度的氯离子含量分布并不均匀。在氯化物运输过程中,会出现聚集体周围流动的现象,因此,聚集体周围的氯离子含量较高。此外,聚集体的随机分布进一步加剧了氯离子含量分布的不均匀性,这种随机分布特征在图6(c)中可直观描述。混凝土模型边缘无骨料,因此A-A段氯离子含量分布曲线平滑,骨料影响不大。B-B和C-C段位于混凝土内部,由于骨料的影响,氯离子含量的分布曲线不平

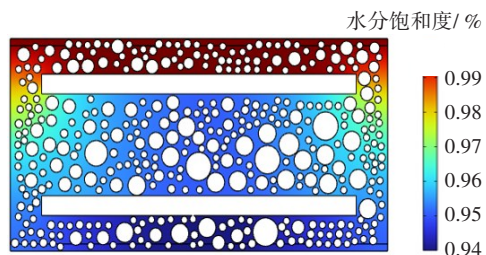
滑,但波动很小。对于A-A部分,氯离子含量的峰值为0.532%,对流区扩散深度为3.632 mm;对于B-B部分,氯离子含量的峰值为0.536%,对流区扩散深度为3.432 mm;对于C-C部分,氯离子含量的峰值为0.541%,对流区扩散深度为3.31 mm。综上所述,可能的原因是钢筋结构的组成,阻挡了相应区域的氯离子传输。靠近中线区域的钢筋混凝土结构由于两侧钢筋阻挡效应的累加^[22-23],进一步抑制了氯离子扩散。随着干湿交替时间的增加,氯离子含量峰值与对流区扩散深度逐渐降低。

与氯离子含量的分布特征类似,相同深度孔隙中水分饱和度的分布也是不均匀的,如图6(b)和图6(d)所示。在图6(b)中,水饱和度的梯度分布是无序的,因此不同部分的对流速率并不是恒定的。在图6(d)中,不同区域的水分饱和度在缓慢减小。

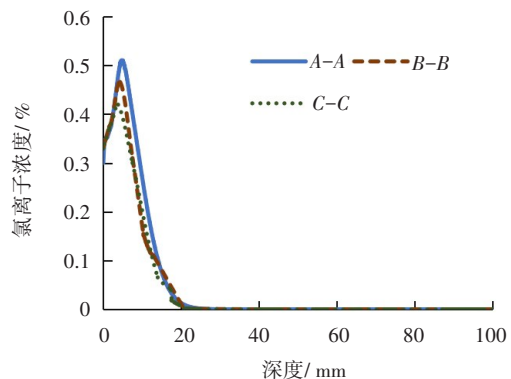
在润湿过程中,由于骨料阻碍水分渗透,混凝土中水分饱和度梯度的平衡过程减慢,对流的作用也在一定程度上减弱^[24]。



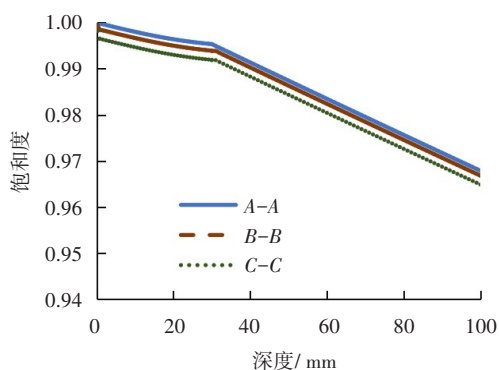
(a) 湿润状态下氯离子含量分布



(b) 湿润状态下水分饱和度分布



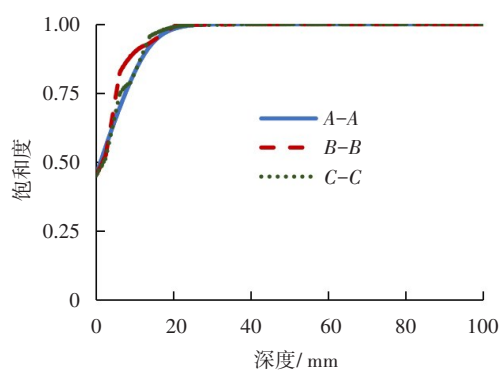
(c) 不同截线氯离子含量分布



(d) 不同截线水分饱和度分布

图6 湿润状态下氯离子含量和水分饱和度的分布

Fig. 6 Distribution of chloride ion content and water saturation in the wet state

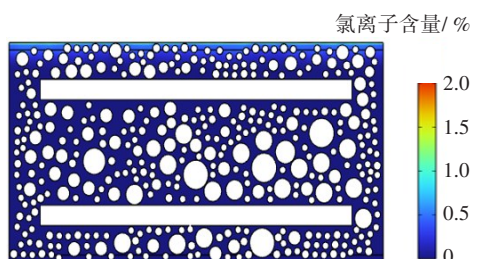


(d) 不同截线水分饱和度分布

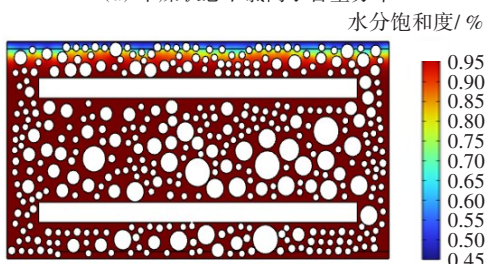
图7 干燥状态下氯离子含量和水分饱和度的分布

Fig. 7 Distribution of chloride content and moisture saturation in the dry state

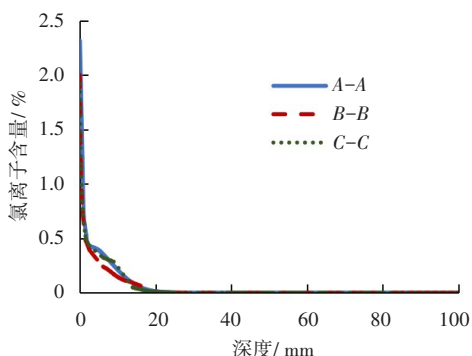
在外部环境的干燥作用下,孔隙水会蒸发掉,这与干燥过程中的宏观输送机理类似。如图7(a)所示,氯离子在对流和扩散的共同作用下,随着水分蒸发而积聚在混凝土表面,因此表层氯离子含量较大,但随着扩散深度的增加,氯离子含量迅速减少。如图7(b)所示,水分饱和度随着扩散深度的增加而增加。从图7(c)和7(d)中可以看出,氯离子含量和水分饱和度的分布同样受到骨料的影响。



(a) 干燥状态下氯离子含量分布



(b) 干燥状态下水分饱和度分布



(c) 不同截线氯离子含量分布

3 参数分析

以钢筋直径分别为0、14和16 mm、干湿时间比 D/W 分别为1:1、2:1和7:1及混凝土内部溶液初始饱和度 s_i 分别为0.1、0.5和1.0等主要参数进行敏感性分析。以A-A截线数据为例,总周期为360 d,结果如图8所示。

从图8(a)可以看出,普通混凝土的氯离子含量小于钢筋混凝土的,而配有16 mm直径钢筋的氯离子含量大于配有14 mm钢筋的。这表明钢筋直径越大,阻挡效果越明显,氯离子含量增加也较快。

从图8(b)可以看出,随着干湿时间比的增加,混凝土内部各深度氯离子含量也在增加。在氯离子对流与扩散的综合作用下,干燥时间越长,混凝土孔隙趋于排空,对流效应趋于明显。随着混凝土内部孔隙趋于饱和状态,扩散作用加快直至内外溶液浓度达到平衡^[25]。

从图8(c)可以看出,初始饱和度对氯离子在混凝土不同深度的分布影响较大。当混凝土内部初始饱和度为0.1时,混凝土内部氯离子含量峰值为0.605%,对流区深度为5.5 mm,相比于混凝土初始饱和度为0.5的情况,对流作用较为明显。当初始饱和度为1.0时,由于氯离子传输主要依靠扩散,氯离子含量在达到峰值后下降较快。初始饱和度越小时,孔隙负压越大,湿润状态开始时吸入

的溶液迅速增加,促进对流效应^[23]。

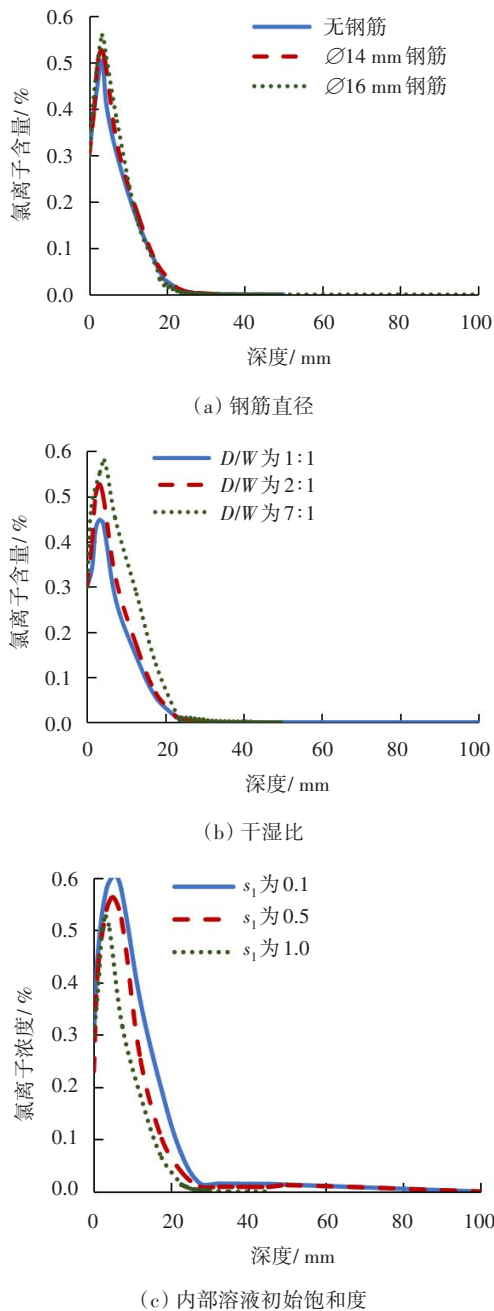


图8 不同参数条件下氯离子含量分布

Fig. 8 Distribution of chloride ion content under different parameter conditions

4 结论

1) 考虑钢筋的阻挡效应,建立干湿交替作用下钢筋混凝土中氯离子对流扩散模型,通过试验验证了该数值模型,发现其具有一定的适用性。

2) 在细观模型中,随着氯离子在混凝土中的积累,氯离子含量的峰值和位置会出现在表层。此

外,骨料分布也会对混凝土中的氯化物输送产生重大影响。

3) 相比于普通混凝土,钢筋混凝土结构的氯离子含量较大,且随着钢筋直径的增加而增加。干湿时间比的增加会加速氯离子在混凝土内的传输,而初始溶液饱和度越低,氯离子含量越高,且初始饱和度为0.1时,氯离子含量峰值达到了0.605%。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] YANG Y M, PENG J X, LIU X H, et al. Probability analysis of web cracking of corroded prestressed concrete box-girder bridges considering aleatory and epistemic uncertainties [J]. Engineering Structures, 2021, 228: 1-10.
- [3] MA Y F, GUO Z Z, WANG L, et al. Experimental investigation of corrosion effect on bond behavior between reinforcing bar and concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 240-249.
- [4] DAI L Z, BIAN H B, WANG L, et al. Prestress loss diagnostics in pretensioned concrete structures with corrosive cracking [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(3):04020013.1-04020013.11.
- [5] WANG L, ZHANG X H, ZHANG Z R, et al. Effects of stirrup and inclined bar corrosion on shear behavior of RC beams [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98:537-546.
- [6] 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):1-11.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 徐现正,刘荣桂,延永东,等.干湿时间比对海工混凝土结构氯盐扩散的影响研究[J].硅酸盐通报, 2016, 35(11):3529-3535.
- [10] XU Xianzheng, LIU Ronggui, LIU Yandong, et al. Effect

- of wet and dry time ratio on chloride diffusion in marine concrete structures [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(11):3529-3535.
- [9] YU F Q, GAO W I, LIU W C. Mechanism analysis and model calculation of chloride ion diffusion in reinforced concrete structure [J]. E3S Web of Conferences: Geosynthetics Applied Design Theory and Method, 2020, 198(5):01035.
- [10] PAPERAR I. Chloride-induced corrosion damage of reinforced concrete structures: case studies and laboratory research [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 58:1588 - 1593.
- [11] CAO T N, ZHANG L J, SUN G W, et al. Simulation of chloride ion transport in concrete under the coupled effects of a bending load and drying - wetting cycles [J]. Construction and Building Materials, 2020, 241 (5) : 118045.
- [12] CHEN D S, FENG Y P, SHEN J Y, et al. Experimental and simulation study on chloride diffusion in unsaturated concrete under the coupled effect of carbonation and loading [J]. Structures, 2022, 43(8):1356-1368.
- [13] ZHANG L J, ZHANG J J, Sun G W, et al. Multi-Scale simulation of two-dimensional chloride transport under the effect of bending load in concrete [J]. Frontiers in Physics, 2021, 9:673764.
- [14] 刘鹏, 宋力, 余志武. 模拟干湿环境对混凝土内水分影响深度的影响 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014(2): 64-73.
LIU Peng, SONG Li, YU Zhiwu. Effect of simulated drying-wetting environment on water influence depth in concrete [J]. Journal of South China University of Technology(natural science edition), 2014(2): 64-73.
- [15] XU J, LI FM, ZHAO J, et al. Model of time-dependent and stress-dependent chloride penetration of concrete under sustained axial pressure in the marine environment [J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 207-216.
- [16] 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.
- [17] 吴林键, 鞠学莉, 马原飞, 等. 钢筋对混凝土中氯离子扩散的阻挡效应预测模型 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (2):296-303+332.
WU Liujian, JU Xueli, MA Yuanfei, et al. Prediction model of chloride diffusion in concrete considering the blocking effects of rebar [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2):296-303+332.
- [18] XU G, LI YP, SU Y B, et al. Chloride ion transport mechanism in concrete due to wetting and drying cycles [J]. Structural Concrete, 2015, 16(2):298-296.
- [19] ANGST U, ELSENER B, LARSEN C K, et al. Critical chloride content in reinforced concrete: a review [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39 (12) : 1122-1138.
- [20] 李春秋, 李克非. 干湿交替下表层混凝土中水分传输: 理论、试验和模拟 [J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(7):1151-1159.
LI Chunqiu, LI Kefei. Moisture transport in concrete cover under drying-wetting cycles: theory, experiment and modeling [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(7):1151-1159.
- [21] 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.
- [22] 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):1-9.
- [23] 马亚飞, 白浩, 苏小超, 等. 基于三维激光扫描的吊索钢丝锈蚀形貌分析 [J]. 交通科学与工程, 2022, 38(2): 33-39, 61.
MA Yafei, BAO Hao, SU Xiaochao, et al. Corrosion morphology analysis of bridge suspender steel wires based on 3D laser scanning method [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(2) : 33-39, 61.
- [24] 关博文, 杨涛, 於德美, 等. 干湿循环作用下钢筋混凝土氯离子侵蚀与寿命预测 [J]. 材料导报, 2016, 30(20): 152-157.
GUAN Bowen, YANG Tao, YU Demei, et al. Chloride erosion and life prediction of steel reinforced concrete under dry and wet cycles [J]. Materials Reports, 2016, 30(20):152-157.
- [25] CHEN D S, FENG Y P, SHEN J Y, et al. Experimental and simulation study on chloride diffusion in unsaturated concrete under the coupled effect of carbonation and loading [J]. Structures, 2022, 43(8):1356-1368.

(责任编辑:欧兆虎;校对:罗容;英文编辑:杜雪明)