

非饱和混凝土中钢筋初锈时间的参数敏感性分析

李辰治^{1,2}, 宋晓滨^{1,2}, 黄庆华^{1,2}, 姜超^{1,2}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于 Fick 第二定律和 Darcy 定律建立了氯离子扩散-对流耦合模型, 并采用 COMSOL Multiphysics 软件进行数值求解。探明了每个干湿循环周期内氯离子含量和含水饱和度的变化规律, 分析了钢筋初锈时间对各影响参数的敏感性。结果表明, 扩散-对流耦合作用导致对流区和峰值氯离子含量的出现。随着暴露时间的增加, 峰值氯离子含量明显增加。对流作用仅在混凝土浅层占据主导, 氯离子在深层区的传输仍以扩散为主。钢筋初锈时间对临界氯离子含量的变化最为敏感, 其次是保护层厚度、氯离子扩散系数、对流区深度和峰值氯离子含量。

关键词: 非饱和混凝土; 钢筋; 扩散-对流; 干湿循环; 初锈时间; 敏感性分析

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Parametric Sensitivity Analysis of Corrosion Initiation Time for Reinforcing Bars in Unsaturated Concrete

LI Chenzhi^{1,2}, SONG Xiaobin^{1,2}, HUANG Qinghua^{1,2}, JIANG Chao^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A diffusion-convection governing equation for chloride transport was established based on the Fick's second law and Darcy's law. Variations of chloride profile and degree of water saturation during each wetting-drying cycle were obtained by using COMSOL Multiphysics software to numerically simulate the diffusion-convection process. Sensitivity of corrosion initiation time to different influencing factors was analyzed. The results indicate that the coupled effects of convection and diffusion lead to the existences of convection zone and peak chloride content.

The peak chloride content significantly increases as the exposure duration increases. Convection effect only dominates the chloride transport in the shallow zone of concrete, the chloride transport in the deep zone is governed by diffusion. Corrosion initiation time is most sensitive to the variation of critical chloride content, followed by the concrete cover depth, chloride diffusion coefficient, convection zone depth and peak chloride content.

Keywords: unsaturated concrete; reinforcing bar; diffusion-convection; wetting-drying cycle; corrosion initiation time; sensitivity analysis

氯盐侵蚀导致的钢筋锈蚀严重影响钢筋混凝土结构的耐久性。氯离子从外界渗透到混凝土中并聚集在钢筋表面, 当累积的氯离子达到临界氯离子含量时, 钢筋表面的钝化膜被击穿并开始发生局部点蚀^[1-2]。氯离子在混凝土中的传输方式主要有扩散、对流和电迁移。扩散是指离子在浓度梯度下的定向迁移; 对流是指离子以溶液为载体发生的迁移, 其驱动力是毛细吸附或压力渗流; 电迁移是指离子在电位梯度下的迁移^[3]。根据氯离子的传输机制和腐蚀程度, 可将海洋环境分为 4 个区域: 大气区、浪溅区、潮汐区和水下区。大气区的混凝土一般是盐雾腐蚀, 不涉及氯离子的传输过程; 水下区的混凝土处于饱水状态, 氯离子通过扩散侵入混凝土, 传输速率较慢; 浪溅区和潮汐区的混凝土腐蚀最严重, 处于干湿交替的非饱和状态, 除了扩散, 大量氯离子还会以水分为载体在对流作用下侵入混凝土, 这种方式称为扩散-对流耦合作用^[4]。

学者们对非饱和混凝土中氯离子的传输机制及其影响因素开展了大量研究。Oh 等^[5]研究了相对湿度、温度、养护龄期、氯离子结合作用和扩散系数时

收稿日期: 2023-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(51938013); 中央高校基本科研业务费专项资金(22120220568)

第一作者: 李辰治, 博士生, 主要研究方向为混凝土结构耐久性。E-mail: chenzhil@tongji.edu.cn

通信作者: 宋晓滨, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构抗震性能。E-mail: xiaobins@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

变性对氯离子传输的影响。结果表明,混凝土中的氯离子随着温度和相对湿度的增加而增加,随着氯离子结合能力的增强而降低;随着养护龄期的增加,氯离子扩散系数的时变性对传输过程的影响逐渐减弱,这是因为长期养护后孔隙结构基本趋于稳定。Zhang等^[6]对暴露于干湿交替环境下的混凝土长期调研后发现,相比于孔结构,含水饱和度对氯离子传输的影响更明显,这是因为含水饱和度同时影响对流和扩散过程。徐港等^[7]研究了轴压应力对氯离子扩散-对流过程的影响。结果表明,轴压应力使毛细吸附作用减弱,进而阻碍了对流过程。轴压应力对扩散的影响取决于应力水平。低应力水平(小于20%)使混凝土变得密实,延缓了氯离子扩散;高应力水平(大于80%)使混凝土内部孔隙、裂缝增多,加速了氯离子扩散。

不同于饱和混凝土,干湿循环过程中混凝土的含水饱和度在不断变化,从而影响着扩散和对流作用的相对强弱,有关干燥和湿润阶段含水饱和度对氯离子传输的影响机理尚不清楚。此外,扩散-对流耦合作用的最终后果是导致钢筋初锈时间提前,有关初锈时间对各参数敏感性的研究并不多见。影响初锈时间的主要因素包括混凝土材料的自身特性、外界环境因素以及临界氯离子含量,各种因素对初锈时间的影响程度不同,因此对初锈时间进行参数敏感性分析有着重要意义,同时也给混凝土结构服役寿命的延长提供了理论指导。

基于Fick第二定律和Darcy定律建立氯离子扩散-对流耦合模型,并采用COMSOL Multiphysics软件对模型进行数值求解,随后分析混凝土中氯离子含量和含水饱和度在每个干湿循环周期的变化规律,同时开展干湿循环试验对模型加以验证。最后,通过敏感性分析量化对流区厚度、氯离子扩散系数、保护层厚度、临界氯离子含量等参数对初锈时间的影响程度。

1 氯离子扩散-对流耦合模型的建立

氯离子扩散-对流耦合模型包括扩散项和对流项,其中对流主要针对氯离子以水分为载体在毛细吸附作用下的传输过程,所以对流项需基于水分传输模型建立。

1.1 水分传输模型

混凝土中的水分以水蒸气和液态水2种形式存在,总的水分传输通量可表示为

$$J_t = J_v + J_l \quad (1)$$

式中, J_v 和 J_l 分别为水蒸气和液态水的传输通量。

混凝土中大部分孔隙为中毛细孔,孔径小于 5×10^{-8} m,低于水蒸气分子的平均自由程(25 °C时为 8×10^{-8} m),因此水蒸气扩散主要为Knudsen扩散。考虑到孔隙率、含水饱和度以及相对湿度的影响,根据Fick第二定律,水蒸气传输通量可表示为

$$J_v = D_v(H)H\nabla p_v(1-S)\varphi \quad (2)$$

式中: $D_v(H)$ 为水蒸气扩散系数; H 为相对湿度; p_v 为饱和蒸汽压; S 为含水饱和度; φ 为孔隙率。根据Bažant等^[8]的研究,水蒸气扩散系数可表示为

$$D_v(H) = D_d \left(a + \frac{1-a}{1 + \left(\frac{1+H}{1+H_0} \right)^n} \right) \quad (3)$$

式中: D_d 为完全干燥状态下的水蒸气扩散系数; a 、 H_0 、 n 为经验参数, $a=0.05$, $H_0=0.792$, $n=6$ ^[8]。

假定混凝土中的液态水不可压缩,因此其耗散效应可忽略,而且水分和固体颗粒间的传热速率足够快,局部的固、液、气三相处于热力学平衡状态。根据毛细理论,液态水的传输是在毛细压力梯度下驱动的,可采用Darcy定律描述为

$$J_l = K_l \nabla p_l \quad (4)$$

式中: p_l 为孔隙溶液压力; K_l 为渗流系数。 K_l 可表示为

$$K_l = \frac{\rho_w \varphi^2}{50B^2 \eta} \left[1 - \left(1 - \frac{2B\omega\gamma \cos \theta}{p_l} \right) \exp \left(\frac{2B\omega\gamma \cos \theta}{p_l} \right) \right]^2 \quad (5)$$

式中: ρ_w 为水的密度; η 为液态水黏滞系数; B 为瑞利-里兹分布参数; γ 为孔隙液表面张力; θ 为孔隙液与毛细管壁接触角; ω 为氯离子质量分数。

根据式(2)、(4),式(1)可表示为

$$J_t = J_v + J_l = D_v(H)H\nabla p_v(1-S)\varphi + K_l \nabla p_l \quad (6)$$

根据混凝土中水分的质量守恒可得

$$\frac{\partial(\varphi \rho_w S)}{\partial t} = \nabla J_t \quad (7)$$

将式(6)代入式(7),整理后可得

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{\varphi \rho_w} \nabla (D_v(H)H\nabla p_v(1-S)\varphi + K_l \nabla p_l) \quad (8)$$

非饱和混凝土中,水分的传输是在含水饱和度梯度下驱动的,可得

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \nabla(D_w(S)\nabla S) \quad (9)$$

式中, $D_w(S)$ 为水分扩散系数。

对比式(8)和式(9), $D_w(S)$ 可表示为

$$D_w(S) = \frac{1}{\varphi\rho_w} [D_v(H)H\nabla p_v(1-S)\varphi + K_i\nabla p_i] \quad (10)$$

考虑到湿润和干燥过程中的水分传输机制是不同的,前者是由毛细吸附引起的,而后者是一个蒸发扩散的过程,因此需对含水饱和度加以区分^[9]:

$$S_w = 1 - \exp\left(\frac{2B\omega\gamma \cos\theta}{p_i}\right) \quad (11)$$

$$S_d = \left(1 - \exp\left(\frac{2B\omega\gamma \cos\theta}{p_i}\right)\right) \cdot \left(1 - \ln\left(1 - \exp\left(\frac{2B\omega\gamma \cos\theta}{p_i}\right)\right)\right) \quad (12)$$

式中: S_w 为湿润阶段的含水饱和度; S_d 为干燥阶段的含水饱和度。

1.2 氯离子传输模型

非饱和混凝土中总的氯离子通量(J_{Cl})由扩散项(J_{diff})和对流项(J_{con})组成,

$$J_{Cl} = J_{diff} + J_{con} \quad (13)$$

氯离子扩散遵循Fick第二定律,同时也受到含水饱和度的影响,

$$J_{diff} = D_{Cl}S\nabla w \quad (14)$$

式中: D_{Cl} 为氯离子扩散系数。

对流项的氯离子通量可以表示为

$$J_{con} = wD_w(S)\nabla S \quad (15)$$

实际情况中氯离子扩散系数并不是恒定的,会受到暴露时间、环境温度、相对湿度和孔结构等因素的影响^[10],所以氯离子扩散系数需要修正为:

$$D_{Cl} = D_{Cl,ref}f_1(t)f_2(T)f_3(H)f_4(\varphi, \tau) \quad (16)$$

$$f_1(t) = \left(\frac{t}{t_{ref}}\right)^m \quad (17)$$

$$f_2(T) = \exp\left(\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (18)$$

$$f_3(H) = \left(1 + \frac{(1-H)^4}{(1-H_c)^4}\right)^{-1} \quad (19)$$

$$f_4(\varphi, \tau) = \frac{\varphi}{\tau^2} \quad (20)$$

式(16)~(20)中: $D_{Cl,ref}$ 为基准扩散系数; t_{ref} 为基准时间,一般取28 d; m 为扩散衰减系数; U 为离子活化能; T_{ref} 为基准温度; R 为气体常数; H_c 为临界相对湿

度,取0.75; τ 为迂曲度, Nakarai等^[11]研究表明,迂曲度主要与孔隙率有关。 τ 计算式为

$$\tau = -1.5 \tanh(8(\varphi - 0.25)) + 2.5 \quad (21)$$

根据质量守恒定律,氯离子在非饱和混凝土中的扩散-对流方程为

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla(D_{Cl}S\nabla w + wD_w(S)\nabla S) \quad (22)$$

含水饱和度 S 在湿润和干燥阶段的取值根据式(11)、(12)确定。

2 扩散-对流耦合模型的数值求解

本文采用COMSOL Multiphysics软件中的“多孔介质物质传递”和“稀物质传递”模块对氯离子的扩散-对流过程进行数值模拟,并分析每个干湿循环周期内混凝土中氯离子质量分数和含水饱和度的分布情况。

2.1 几何模型

根据富勒分布曲线,在Matlab软件中生成粒径5~25 mm连续级配的圆形骨料,级配系数为0.5,骨料体积分数为0.45,骨料之间不重叠,混凝土模型边长为150 mm,如图1所示。数值模拟过程中,混凝土被看作由粗骨料、砂浆和界面过渡区(ITZ)组成的三相复合材料,ITZ厚度为30 μm , ITZ扩散系数为基准扩散系数的30倍^[12]。

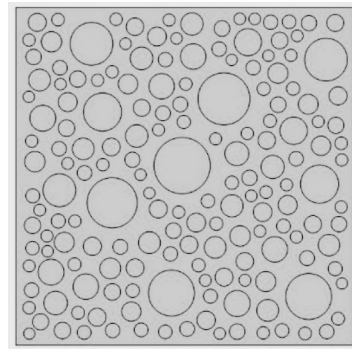


图1 混凝土中骨料随机投放的几何模型

Fig.1 Geometric model of concrete with randomly packed aggregates

2.2 边界条件和参数设定

初始状态下混凝土中氯离子质量分数 w_0 为零,所以初始条件设置为:

$$S(x, t=0) = S_{mi}, w(x, t=0) = w_0 = 0 \quad (23)$$

式中: S_{mi} 为初始含水饱和度; x 为距离。

湿润过程中,混凝土表面一直与溶液接触,所以表面的含水饱和度维持在1.0;表面氯离子质量分数

采用文献[13]中提出的幂函数增长模型:

$$\begin{cases} S(x=0, t) = 1.0 \\ w(x=0, t) = 0.397 \left(\frac{t}{t_{\text{ref}}} \right)^{0.152} \end{cases} \quad (24)$$

干燥过程中,水分以一定的速率从混凝土表面向外界蒸发,直到混凝土表面的含水饱和度与外界达到平衡。由于氯离子不能随着水分蒸发迁移到外界环境中,因此界面处的氯离子通量为零。此时,边界条件应满足:

$$\begin{cases} S(x=0, t) = S_{\text{equ}} \\ (D_{\text{Cl}} S \nabla w + w D_w(S) \nabla S)|_{x=0} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

式中, S_{equ} 为与外界达到平衡时的含水饱和度。

氯离子扩散-对流数值模拟的参数取值如表1所示。

2.3 干湿循环过程中含水饱和度和氯离子质量分数的变化规律

每一个干湿循环包括7 d的湿润阶段和7 d的干

表1 氯离子扩散-对流数值模型中相关参数的取值
Tab.1 Numerical model parameters of chloride diffusion-convection process

参数	取值	来源
基准扩散系数, $D_{\text{Cl,ref}} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	6.84×10^{-12}	文献[13]
扩散衰减系数, m	0.281	文献[13]
水蒸气扩散系数, $D_v / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	2.45×10^{-5}	文献[14]
孔隙液表面张力, $\gamma / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	0.072 75	文献[14]
孔隙液与毛细管壁接触角, θ / rad	0	文献[12]
初始含水饱和度, S_{ini}	1.0	文献[12]
平衡含水饱和度, S_{equ}	0.5	文献[12]
液态水黏滞系数, $\eta / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	8.01×10^{-4}	
瑞利-里兹分布参数, B	10^7	
温度, T / K	298	测量
相对湿度, H	0.8	测量

燥阶段。图2、3为第7 d时混凝土中含水饱和度和氯离子质量分数的分布情况。由于初始含水饱和度设定为1.0,因此含水饱和度在第1个湿润阶段(0~7 d)维持在1.0。混凝土处于饱水状态,孔隙液相对静止,不发生流动,没有发生对流作用,氯离子只能通过扩散进入混凝土,扩散速率较慢,仅传输到混凝土浅层区域。

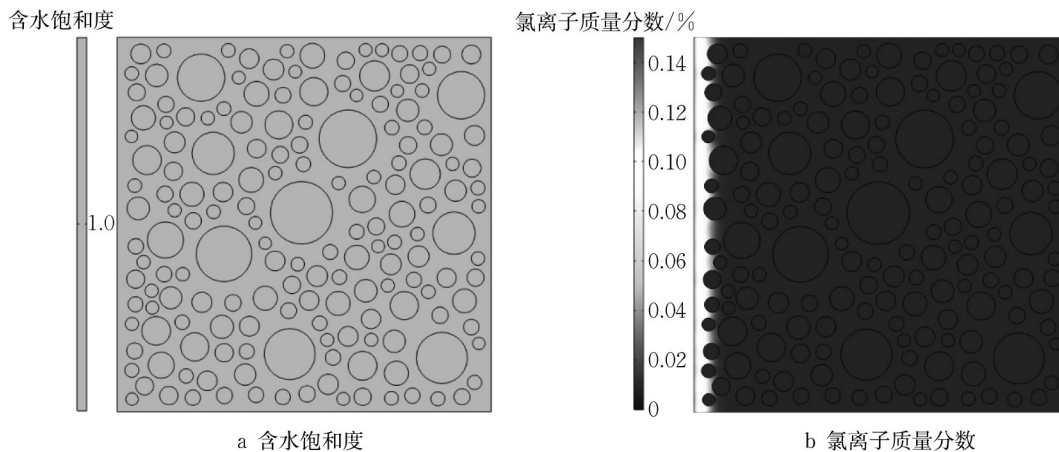


图2 第7 d时含水饱和度和氯离子质量分数数值模拟结果

Fig.2 Numerical simulation results of degree of water saturation and chloride profile on the 7th day

第14 d时含水饱和度和氯离子质量分数的分布情况如图4、5所示。第1个干燥阶段(7~14 d),混凝土浅层的孔隙水从混凝土表面蒸发到外界,导致浅层的含水饱和度下降;深层区域的孔隙水并没有蒸发,其含水饱和度维持在1.0。浅层水分的蒸发导致一部分氯离子随着孔隙水向混凝土表面迁移,深层区的氯离子在扩散作用下继续向内部传输,因此在浅层区出现了一个峰值氯离子质量分数。

图6、7为第21 d时混凝土中含水饱和度和氯离子质量分数的分布情况。在第2个湿润阶段(14~21 d),水分的流入导致混凝土内部的含水饱和度比

起之前的干燥阶段明显提高。在浅层区出现了一个含水饱和度的凹面,这是因为在干燥阶段失水过多,浅层区在短时间内难以恢复到饱水状态,所以含水饱和度相对偏低;混凝土表面与外界溶液一直接触,其含水饱和度一直维持在1.0。氯离子在扩散-对流传耦合作用下传输,对流作用使得浅层区的氯离子比上一个湿润阶段明显增加,而深层区的氯离子变化不大。

第28 d时含水饱和度和氯离子质量分数的分布情况如图8、9所示。第2个干燥阶段(21~28 d)与上一个干燥阶段类似,水分以一定的速率从混凝土表

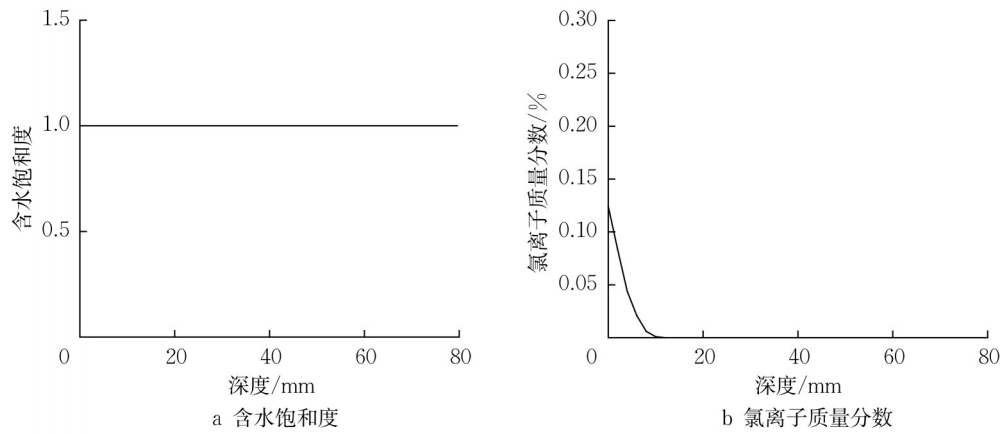


图3 第 7 d 时含水饱和度和氯离子质量分数分布曲线

Fig.3 Distribution curves of degree of water saturation and chloride profile on the 7th day

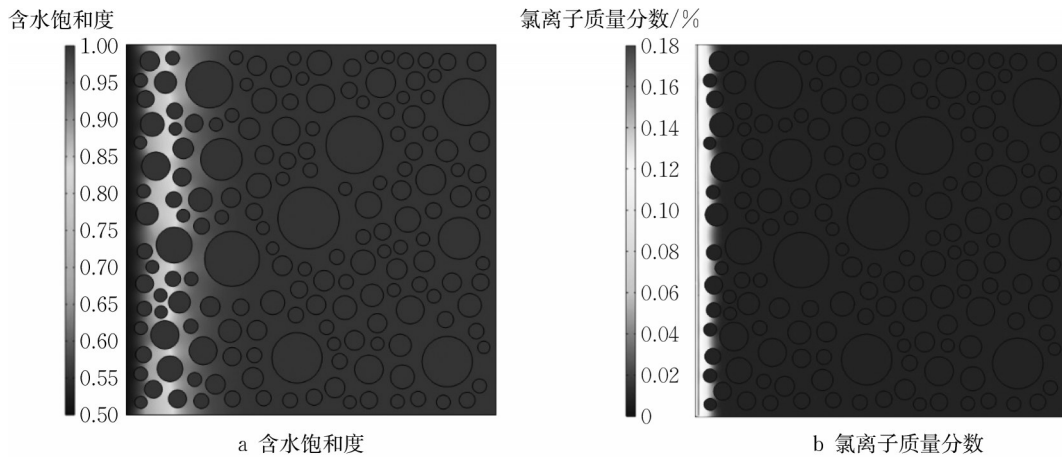


图4 第 14 d 时含水饱和度和氯离子质量分数数值模拟结果

Fig.4 Numerical simulation results of degree of water saturation and chloride profile on the 14th day

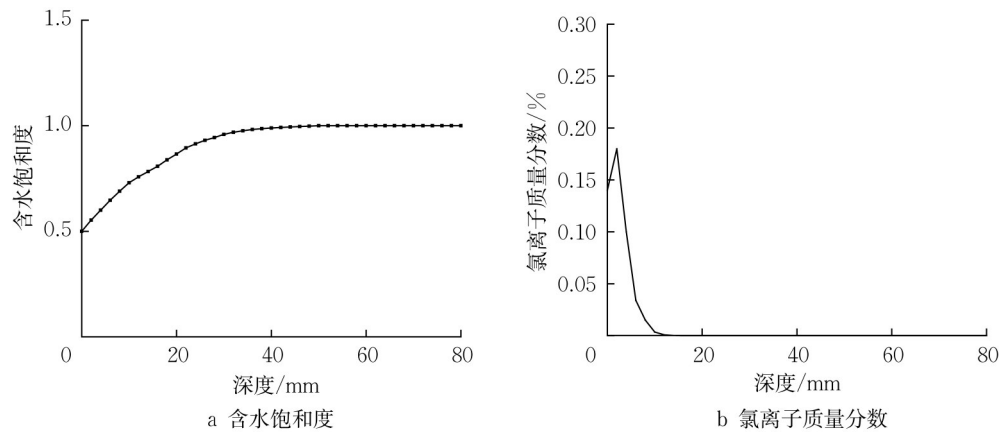


图5 第 14 d 时含水饱和度和氯离子质量分数分布曲线

Fig.5 Distribution curves of degree of water saturation and chloride profile on the 14th day

面蒸发,氯离子仍保留在混凝土内。氯离子向 2 个方向移动:浅层氯离子以孔隙液为载体向混凝土表面迁移,深层氯离子在扩散作用下继续向混凝土内部传输。由于氯离子的进一步累积,因此这一阶段的峰值氯离子质量分数继续增加。

2.4 数值模型的试验验证

采用 P·II 42.5 水泥,比表面积和密度分别为 $325 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3140 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。细骨料采用细度模数为 2.6 的天然河砂,粗骨料为 5~25 mm 连续级配的碎石,减水剂为聚羧酸减水剂,混凝土试块尺寸为

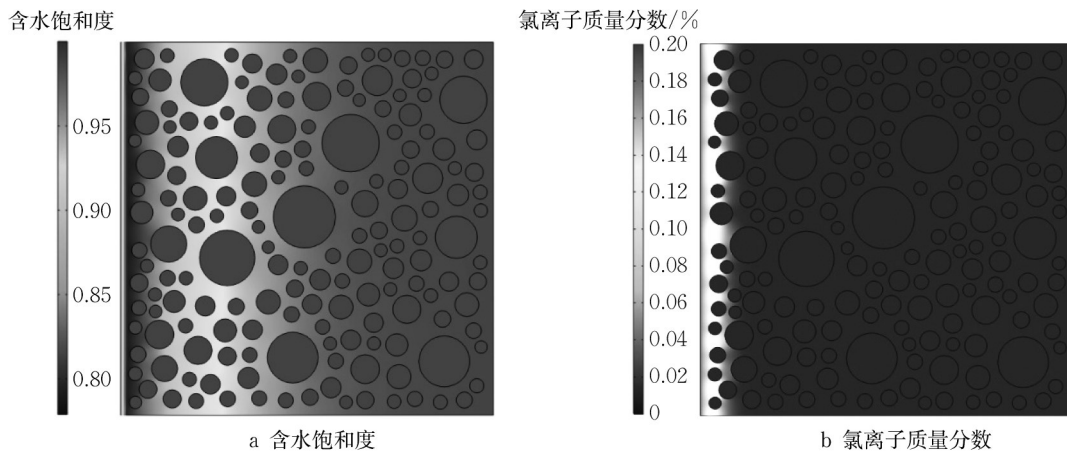


图6 第21 d时含水饱和度和氯离子质量分数数值模拟结果

Fig.6 Numerical simulation results of degree of water saturation and chloride profile on the 21st day

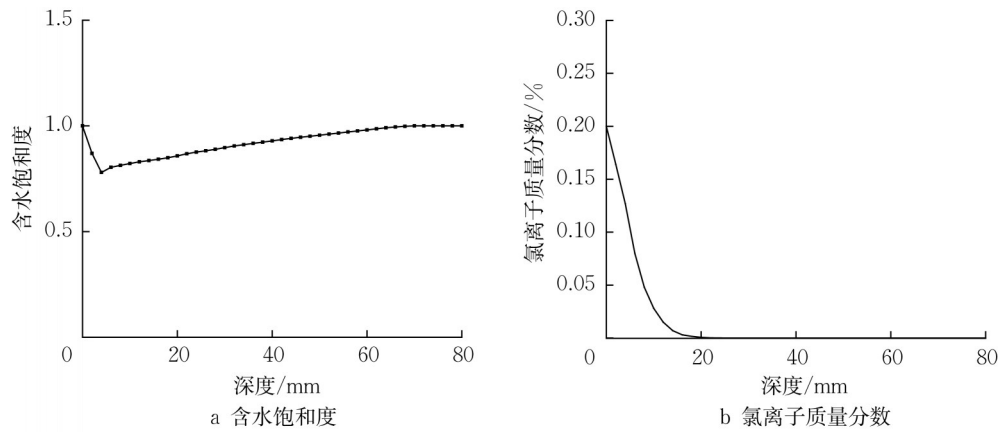


图7 第21 d时含水饱和度和氯离子质量分数分布曲线

Fig.7 Distribution curves of degree of water saturation and chloride profile on the 21st day

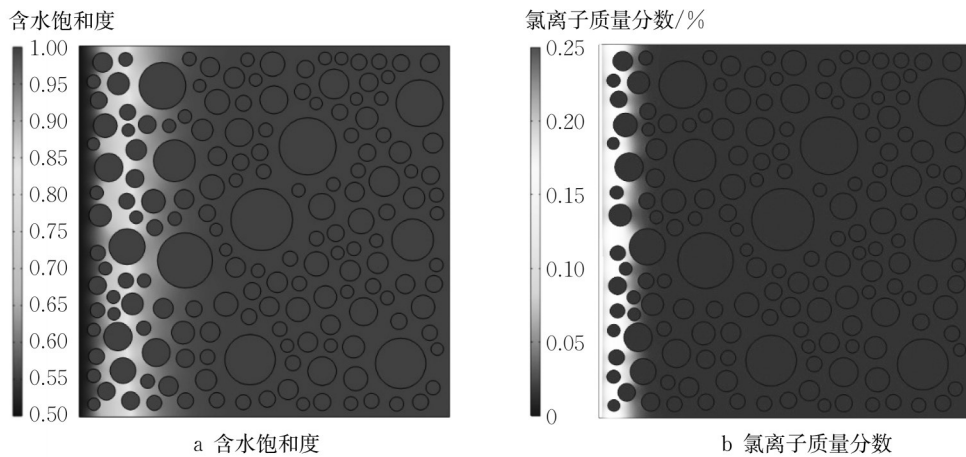


图8 第28 d时含水饱和度和氯离子质量分数数值模拟结果

Fig.8 Numerical simulation results of degree of water saturation and chloride profile on the 28th day

150 mm × 150 mm × 150 mm, 配合比见表2。

为了模拟潮汐区和浪溅区的暴露条件,对混凝土试块进行干湿循环处理,每个干湿循环周期为14 d。先将试块在质量分数为3.5%的NaCl溶液中浸

泡7 d,然后在55℃的干燥箱中烘干7 d。浸泡阶段每4周更换1次溶液以保持溶液中氯离子质量分数的稳定。每个试块只留1个暴露面,其余5个面用环氧树脂密封。当干湿循环至56、84、140、224 d后,

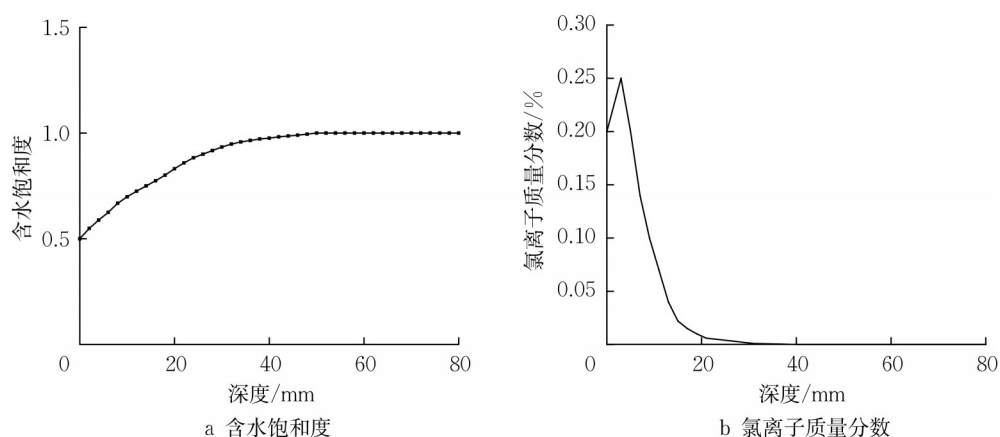


图9 第28 d时含水饱和度和氯离子质量分数分布曲线

Fig.9 Distribution curves of degree of water saturation and chloride profile on the 28th day

表2 混凝土试块配合比

Tab.2 Mix proportion of concrete specimens

水泥/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	砂/(kg·m ⁻³)	石子/(kg·m ⁻³)	减水剂/(kg·m ⁻³)
400	160	559	1 168	2.0

将试块取出并切片磨粉。采用电位滴定法测量不同深度处的游离氯离子质量分数(相对于混凝土质量),具体操作过程可参考ASTM-C1218^[15]。

不同干湿循环周期后混凝土中的氯离子分布如图10a所示。干湿交替作用下,混凝土浅层的氯离子

在扩散-对流耦合作用下传输,而深层氯离子仅在扩散作用下传输。由于对流速率远大于扩散速率,浅层氯离子的累积速率大于深层氯离子向内部扩散的速率,因此浅层区出现了一个峰值氯离子质量分数,又称氯离子富集现象。从混凝土表面到峰值氯离子质量分数这部分区域称为对流区,其厚度约为4~6 mm,这与Gao等^[16]的研究结果一致。数值模拟结果与试验结果的误差分析如图10b所示,相对误差小于±15%,说明模型的精度良好。

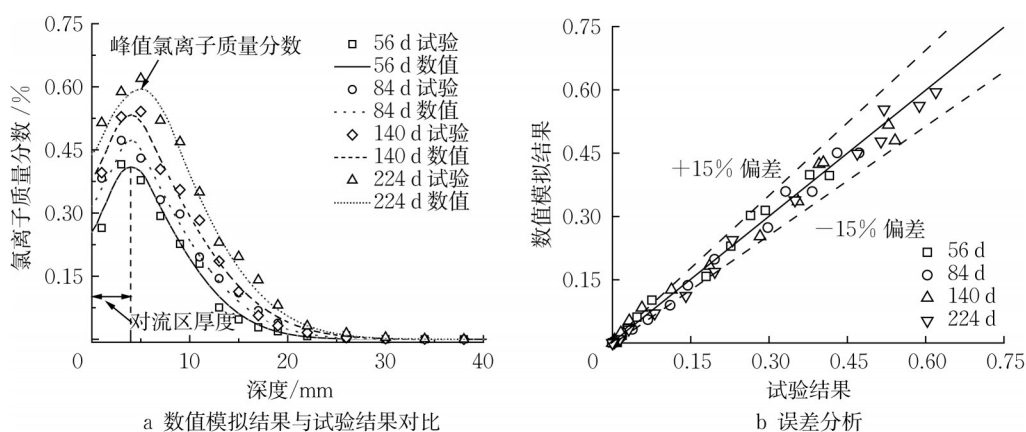


图10 扩散-对流数值模型验证

Fig.10 Validation of diffusion-convection numerical model

3 初锈时间敏感性分析

为了更直观地反映对流作用对氯离子传输的影响,通过数值模拟分别对扩散和扩散-对流耦合作用下混凝土中的氯离子质量分数分布进行预测。如图11所示,在对流作用下,浅层区的氯离子质量分数明显增加,而深层区的氯离子质量分数差异不大,说明

对流效应仅在浅层占主导地位,深层氯离子传输仍以扩散为主。

除了氯离子传输过程,临界氯离子质量分数对钢筋初锈时间也有着重要影响。临界氯离子质量分数对应于钢筋表面能够导致钝化膜破裂的最低氯离子质量分数,取决于胶凝材料、钢筋化学成分、混凝土内环境^[17-18]。本文根据文献[19]将临界氯离子质

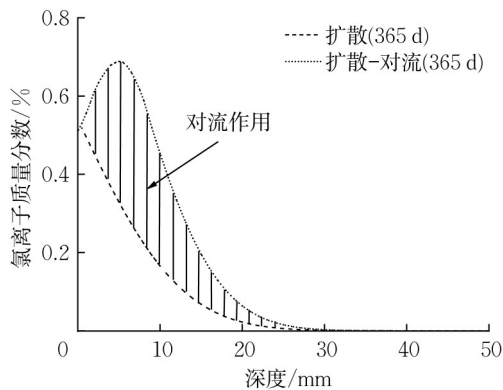


图 11 扩散和扩散-对流耦合作用下氯离子质量分数的比较
Fig.11 Comparison between chloride profiles induced by diffusion and diffusion-convection

量分数取为 0.15%，在此基础上对初锈时间进行参数敏感性分析，量化各因素对初锈时间的影响程度。基准组取值为：保护层厚度 45 mm，临界氯离子质量分数 0.15%，峰值氯离子质量分数 0.60%，氯离子扩散系数 $6.84 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，对流区深度 6 mm。敏感性分析中对初锈时间和各影响因素均进行量纲一处理。由图 12 可知，初锈时间对临界氯离子质量分数的变化最敏感，其次是保护层厚度、氯离子扩散系数、对流区深度和峰值氯离子质量分数。实际工程中，提高临界氯离子质量分数是延缓钢筋锈蚀的最有效方法，同时也可以适当地增加保护层厚度，并通过减小水灰比和掺入辅助胶凝材料来降低氯离子扩散系数。

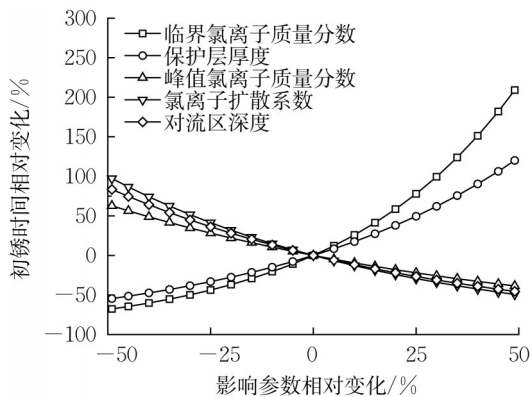


图 12 初锈时间参数敏感性分析
Fig.12 Sensitivity analysis of corrosion initiation time to different influencing factors

4 结论

(1) 氯离子在混凝土浅层中的传输以对流为主，随着深度的增加，含水饱和度提高，对流作用减弱，

扩散作用增强。

(2) 湿润过程中，水分对流携带大量氯离子进入混凝土；干燥过程中，浅层水分的蒸发导致峰值氯离子质量分数和对流区的出现，同时使得浅层含水饱和度和度降低，为下次湿润过程中水分的对流提供充分条件。峰值氯离子质量分数随着暴露时间增加而增大，对流区深度为 4~6 mm。

(3) 敏感性分析表明，初锈时间对临界氯离子质量分数的变化最敏感，其次是保护层厚度、氯离子扩散系数、对流区深度和峰值氯离子质量分数。提高临界氯离子质量分数并适当地增加保护层厚度是延缓钢筋锈蚀的最有效方法。

作者贡献声明：

李辰治：试验设计，数据分析，初稿撰写，论文修改。
宋晓滨：项目构思，课题指导，论文审阅与修改。
黄庆华：试验设计，课题指导。
姜超：论文修改指导。

参考文献：

- [1] 郭弘原, 顾祥林, 周彬彬, 等. 基于概率密度演化的锈蚀混凝土梁时变可靠性分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 67. GUO Hongyuan, GU Xianglin, ZHOU Binbin, *et al.* Time-dependent reliability analysis for corroded RC beams based on probability density evolution theory [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1): 67.
- [2] 周彬彬, 顾祥林, 张伟平. 海洋大气环境下钢筋混凝土梁可预期寿命设计方法[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 82. ZHOU Binbin, GU Xianglin, ZHANG Weiping. Design method of expected service life for reinforced concrete beams under marine atmospheric environment [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1): 82.
- [3] 李镜培, 李鹤. 海洋环境下混凝土方桩使用寿命预测模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 1371. LI Jingpei, LI He. Service life prediction model of concrete square piles in marine environment [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(9): 1371.
- [4] 邵伟, 李镜培. 氯离子侵蚀钢筋混凝土管桩的使用寿命预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 1820. SHAO Wei, LI Jingpei. Service life prediction of reinforced concrete pile due to chloride ion corrosion [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(12): 1820.
- [5] OH B H, JANG S Y. Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(1): 47.
- [6] ZHANG Y, YE G, YANG Z. New insights into long-term chloride transport in unsaturated cementitious materials: role of degree of water saturation [J]. Construction and Building

(下转第 660 页)