

盐冻融环境下钢筋混凝土结构锈蚀寿命预测

彭艳周^{1,2}, 高军^{1,2}, 徐港^{1,2}, 李想^{1,2}

(1. 三峡大学湖北省防灾减灾重点实验室, 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002)

摘要:针对北方海洋环境冻融作用和氯离子侵蚀对钢筋混凝土结构的服役寿命的影响, 基于 Fick 第二定律, 建立了混凝土内综合考虑时间、温度、湿度、氯离子结合和冻融损伤效应的氯离子传输模型, 并运用该模型对青岛海湾大桥桥墩混凝土进行了结构锈蚀寿命预测。结果表明: 混凝土构件中钢筋对氯离子的传输具有明显的阻滞效应, 氯离子在靠近保护层一侧的钢筋表面累积, 而远离保护层一侧钢筋表面会产生浓度迟滞; 角区较非角区钢筋表面氯离子浓度峰值更高, 且浓度峰值随侵蚀时间延长而增大; 角区钢筋表面氯离子浓度分布形式随侵蚀时间而变, 初期钢筋表面氯离子浓度峰值在钢筋距构件正、侧表面最近处, 后期转向两侵蚀面对角处; 较无盐冻融环境而言, 其他条件相同时, 经历冻融循环作用后混凝土结构的锈蚀寿命显著降低, 且角区与非角区钢筋锈蚀寿命的差异明显增大。

关键词: 混凝土结构; 冻融损伤; 氯离子; 扩散; 寿命预测

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2019)03-0044-06

Prediction for corrosion life of reinforced concrete structures under salt freeze-thaw environment//PENG Yanzhou^{1,2}, GAO Jun^{1,2}, XU Gang^{1,2}, LI Xiang^{1,2}(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Freeze-thaw action and chloride corrosion both have influences on the service life of reinforced concrete structures under northern marine environment. Based on the Fick's second law, a model for chloride ion migration within concrete, in which the effect of time, temperature, humidity, chlorine binding capacity and the freeze-thaw damage effect had been taken into account, was established in this paper. The model was used to predict the corrosion life for the reinforced concrete piers of the Qingdao Bay Bridge. The results show that rebars inside concrete members have an obvious blocking effect on chloride ion migration. Chloride ions are likely to accumulate on the surface of the steel bar near the protective layer while concentration retardation appears on the surface of the steel bar far away from the protective layer. The peak chloride concentration in the corner region is higher than that in the non-corner region of a concrete member, and the peak values rise with the erosion time. The distribution of chloride concentration around the rebar in the inner corner of the member varies with the erosion time. At the beginning of the erosion, the peak chloride concentration occurs on the surface of the rebar perpendicular to the eroded surface, and then, it turns to appear at the diagonal of the two eroded surfaces. Compared the results in the non-salt freeze-thaw environment, the corrosion life of the concrete structure is dramatically reduced after a freeze-thaw cycle in salt environment, and the distinction of the corrosion life of the concrete component between the corner and non-corner areas also significantly increases.

Key words: concrete structure; freezing-thawing damage; chloride ion; diffusion; service life prediction

氯离子侵蚀是影响钢筋混凝土结构耐久性的主要原因, 当氯离子传输到钢筋表面并累积到一定浓度时会引起钢筋锈蚀, 从而缩短结构的服役寿命。近年来, 国内外学者围绕氯盐环境下钢筋混凝土结构锈蚀寿命预测进行了较为深入的研究, 重点探究了不同干湿环境下混凝土中氯离子的传输模型^[1-5]、不同因素对混凝土中氯离子扩散系数取值的影响^[6-10]、混凝土表面氯离子浓度(本文浓度均指质量

分数)的演化特征^[11-13]、钢筋锈蚀时临界氯离子浓度的变化规律^[14-15]等。但已有成果主要集中于正温环境, 对冻融等正负变温环境下混凝土中氯盐传输特性的研究较少, 更鲜有考虑到混凝土受冻融损伤后其氯离子扩散系数沿冻融损伤深度方向的变化以及低温对氯离子在混凝土中的传输的抑制作用^[16]等特征。此外, 相关研究常以混凝土保护层深度处氯离子浓度达到临界氯离子浓度来预测钢筋起

基金项目: 湖北省自然科学基金(2018CFB642); 国家自然科学基金(51379111)

作者简介: 彭艳周(1974—), 男, 副教授, 博士, 主要从事混凝土材料与结构耐久性研究。E-mail: pnyzh@163.com.

通信作者: 徐港(1974—), 男, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构耐久性研究。E-mail: postxg@163.com.

锈时间,未考虑氯离子传输至钢筋表面扩散受阻引起的累积效应导致钢筋起锈时间提早。为此,本文在已有研究成果的基础上,基于 Fick 第二定律对氯离子扩散系数进行修正,构建了冻融环境下混凝土内综合考虑时间、温度、湿度、氯离子结合和冻融损伤效应的氯离子传输模型。结合工程实例,借助多物理场耦合软件 Comsol Multiphysics 建立仿真模型,数值分析了盐冻融环境下是否考虑混凝土冻融损伤对钢筋发生锈蚀年限的影响,并探讨了混凝土构件中不同位置钢筋表面氯离子浓度的分布情况和起锈时间的差异。

1 氯离子传输模型

当环境中的氯离子入侵到混凝土内部时,一部分氯离子与水泥水化产物发生反应,生成 Friedel 盐,即所谓的化学结合,或吸附在 C-S-H 凝胶表面和凝胶孔壁的物理结合,这部分氯离子称为结合氯离子;另一部分可以自由向混凝土内部扩散,称为自由氯离子。结合氯离子与自由氯离子的总和称为总氯离子,其中只有自由氯离子会对钢筋造成腐蚀。基于 Fick 第二定律,采用 Langmuir 结合模型^[17]考虑结合作用的氯离子扩散方程为

$$\left[1 + \frac{\alpha}{(1 + \beta C_f)^2}\right] \frac{\partial C_f}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C_f) \quad (1)$$

式中: C_f 为自由氯离子浓度; D 为混凝土氯离子扩散系数; t 为时间; α 和 β 为 Langmuir 结合常数,与混凝土胶凝材料种类有关。Ishida 等^[18]基于实验数据取 $\beta = 4.0$,并分别给出了适用于普通混凝土、掺矿渣和粉煤灰混凝土的 α 值:

$$\alpha = 11.8 \quad (2)$$

$$\alpha = -34.0b^2 + 23.3b + 11.8 \quad (0 \leq b \leq 0.6) \quad (3)$$

$$\alpha = -15.5f^2 + 1.8f + 11.8 \quad (0 \leq f \leq 0.4) \quad (4)$$

式中: b 、 f 分别为矿渣和粉煤灰质量占胶凝材料总质量的比例, $0 \leq b < 1$, $0 \leq f < 1$ 。

1.1 扩散系数修正

1.1.1 混凝土龄期对氯离子扩散系数的影响

混凝土水化是一个缓慢的过程,随着水化的缓慢进行,混凝土的孔结构会得到逐步改善,从而使得氯离子扩散系数逐渐减小。根据 Kwon 等^[19]的试验研究,混凝土龄期 t_c 对氯离子扩散系数的影响可表示为

$$f_1(t_c) = \begin{cases} \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \left(\frac{t_{ref}}{t_c}\right)^m dt_c = \frac{1}{1-m} \left(\frac{t_{ref}}{t_c}\right)^m & t_c < t_R \\ \left(1 + \frac{t_R}{t_c} \frac{m}{1-m}\right) \left(\frac{t_{ref}}{t_R}\right)^m & t_c \geq t_R \end{cases} \quad (5)$$

式中: t_{ref} 为参考时间,通常取 28 d; t_R 为氯离子扩散系数变为常数的时间,该时间通常取 30 a; m 为描述

氯离子扩散系数随时间衰减的系数。美国 Life-365 标准设计程序^[20]给出了掺有粉煤灰和矿渣混凝土的氯离子扩散系数随时间衰减系数:

$$m = 0.2 + 0.4 \left(\frac{f}{0.5} + \frac{b}{0.7}\right) \quad (6)$$

1.1.2 温度对氯离子扩散系数的影响

根据 Arrhenius 法则,Mangat 等^[21]给出了环境温度对氯离子扩散系数影响的表达式:

$$f_2(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (7)$$

式中: U 为扩散过程活化能, kJ/mol; R 为理想气体常数,取值为 8.314 J/(mol · K); T_{ref} 为环境参考温度,取值为 293 K; T 为环境实际温度, K。

1.1.3 相对湿度对氯离子扩散系数的影响

Xi 等^[1]建立了相对湿度对氯离子扩散系数影响模型:

$$f_3(H) = \left[1 + \left(\frac{1-H}{1-H_c} \right)^4 \right]^{-1} \quad (8)$$

式中: H 为混凝土所处环境实际相对湿度; H_c 为混凝土所处环境临界相对湿度,一般取 $H_c = 0.75$ 。

1.1.4 冻融损伤对氯离子扩散系数的影响

在冻融循环作用下,混凝土中孔隙水因受冻而膨胀,并使混凝土内部产生拉应力,进一步混凝土内部产生微裂缝,导致混凝土渗透性增加。综合考虑国内外相关研究^[22]分析得出冻融损伤对混凝土氯离子扩散系数的影响如下:

$$f_4(N) = \frac{1}{N} \int_0^N e^{aN} dN = \frac{1}{aN} (e^{aN} - 1) \quad (9)$$

式中: N 为冻融循环次数; a 为试验拟合系数,其取值与水胶比和胶凝材料种类有关,范围为 0.011 ~ 0.027^[22-24]。

北方冻融环境下混凝土年均自然冻融损伤程度约相当于 k 次室内快速冻融循环造成的混凝土劣化,则式(9)可换算为关于时间的变量:

$$\frac{1}{N} \int_0^N e^{aN} dN = \frac{1}{t} \int_0^t e^{\frac{kat}{365}} dt = \frac{365}{kat} (e^{\frac{katt}{365}} - 1) \quad (10)$$

式中: k 为混凝土年均自然冻融循环等效成室内快速冻融循环的次数。

1.1.5 修正的氯离子扩散系数

考虑时间、温度、湿度及冻融损伤的混凝土氯离子扩散系数为

$$D = D_{28} f_1(t_c) f_2(T) f_3(H) f_4(N) \quad (11)$$

式中: D_{28} 为养护龄期为 28 d 混凝土氯离子扩散系数。Petcherdchoo^[25]根据试验数据进行回归分析得出掺有粉煤灰混凝土 D_{28} 表达式:

$$D_{28} = 10^{1.776+1.364\frac{W}{B}} + (5.806 - 18.69 \frac{W}{B}) f \quad (12)$$

式中: W/B 为混凝土水胶比。

1.2 冻融损伤区扩散系数

常规氯离子扩散系数是综合考虑混凝土一定厚度范围内扩散系数的平均值,而混凝土结构发生冻融损伤时,往往由表及里逐渐发展,结构表面损伤程度最为严重,向内延伸发展时损伤程度逐渐减弱^[26],因此混凝土发生冻融损伤后由于内外部损伤程度不同,冻融损伤厚度范围内沿冻融损伤深度方向其扩散系数是逐渐减小的。

为保证扩散系数在冻融损伤区和未冻融损伤区界面处的连续性,不妨将式(11)算得的扩散系数设为混凝土最外层扩散系数,将不考虑冻融损伤算得的扩散系数设为两区交界处的扩散系数。假设在冻融损伤区沿厚度方向, D 变化遵循指数函数关系:

$$D = D_{28}f_1(t_c)f_2(T)f_3(H)f_4(N)e^{pd} \quad (13)$$

式中: d 为冻融损伤厚度, mm; p 为氯离子扩散系数沿冻融损伤厚度方向衰减系数, 其值可通过将混凝土最外层氯离子扩散系数和两区交界处扩散系数代入式(13)得到。

未冻融损伤区可认为 D 沿混凝土厚度方向不变:

$$D = D_{28}f_1(t_c)f_2(T)f_3(H) \quad (14)$$

1.3 初始条件及边界条件

氯离子二维迁移模型的初始条件及边界条件分别为

$$C_i(P \in \Omega, t = 0) = C_{i0} \quad (15)$$

$$C_i(P \in \Gamma_1, t) = C_{i0} \quad (16)$$

$$\mathbf{n} \cdot (D \nabla C_i(P \in \Gamma_2, t)) = 0 \quad (17)$$

式中: Ω 表示混凝土内部区域; P 为求解域中的某一点, P 点的坐标为 (x, y) ; Γ_1 和 Γ_2 为混凝土边界, 其中 Γ_1 为混凝土受氯离子侵蚀边界, Γ_2 为无通量边界; \mathbf{n} 为沿无通量边界的方向向量; C_{i0} 为混凝土内初始自由氯离子浓度; C_{i0} 为暴露于氯离子环境的混凝土构件表面氯离子浓度。

2 模型验证

李金玉等^[27]通过研究得出室内外冻融循环次数之间的对比关系平均为 1 : 12.5, 即室内一次快速冻融循环相当于自然条件下 12.5 次冻融循环, 而李晔等^[28]指出天津市年均自然冻融次数为 77 次, 由此可算出天津港码头混凝土每年等效快速冻融循环次数为 6.16 次。天津港码头梁板处 7 ~ 8 段和 14 ~ 15 段的混凝土(水灰比为 0.5)使用年限分别为 11 a 和 24 a^[29], 计算可得此两区段混凝土等效快速冻融循环次数分别为 67.76 次和 147.84 次。张云清等^[30]的研究表明, 水胶比为 0.5 的混凝土在盐

冻融循环 220 次后冻融损伤厚度约为 33 mm。假设盐冻融损伤厚度与冻融循环次数呈线性关系, 推算可知, 该码头两区段混凝土盐冻融损伤厚度分别约为 10 mm 和 22 mm。

基于以上现场实测及试验数据, 采用有限元软件 Comsol Multiphysics 构建模型进行仿真分析, 图 1 为天津港码头混凝土试件中氯离子浓度的实测值和仿真值随侵蚀深度的分布。由图 1 可见, 模型计算值与实测值吻合程度较好, 表明所建立的模型可用于对氯离子传输的预测。

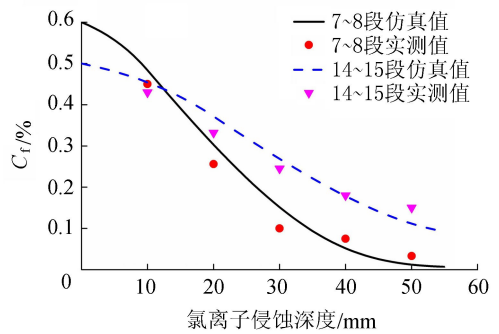


图 1 两区段氯离子浓度分布

3 模型应用

青岛海湾大桥横跨胶州湾, 为我国首座冰冻海域特大型桥梁。青岛海湾大桥桥墩混凝土水胶比为 0.34, 保护层厚度为 50 mm。张峰等^[31]通过研究得出青岛海湾大桥桥墩混凝土每年所遭受自然冻融循环次数相当于 3.76 次室内快速冻融循环, 贾超等^[32]预测大桥运营 100 a 后混凝土冻融损伤厚度为 37 mm。图 2 为盐冻融环境下钢筋混凝土构件二维受蚀示意图, 图中带有箭头的 3 个界面为混凝土受氯离子侵蚀边界, 路径 1 和 2 分别表示混凝土受一维和二维侵蚀。采用多物理场耦合软件 Comsol Multiphysics 建立盐冻融环境下钢筋混凝土构件二维受蚀模型, 设置直径为 16 mm 的角区和非角区钢筋, 保护层设置为 50 mm, 混凝土每年遭受冻融损伤厚度为 0.37 mm, 表面氯离子浓度取 0.7%, 导致钢筋锈蚀的临界氯离子浓度取为 0.1%^[14]。采用自由三角形网格对模型进行单元划分, 将钢筋与混凝土

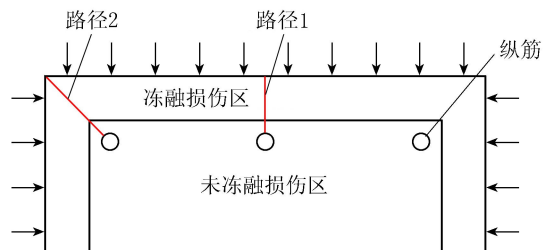


图 2 冻融环境下氯离子二维迁移示意图

土界面处的网格进行加密处理,模型最大单元尺寸为 1.95 mm,最小单元尺寸为 0.025 mm。

图 3 显示了不同侵蚀年限沿路径 1 和路径 2 氯离子浓度分布,同一深度处,角区混凝土氯离子累积浓度比非角区高,这主要是因为构件边角部位会受到两个方向的氯离子侵蚀,发生二维扩散作用。冻融损伤区氯离子浓度随着深度的增加缓慢减小,之后到达非冻融损伤区,氯离子浓度随着深度的增加迅速下降。这是因为经过冻融损伤后混凝土材料劣化,在冻融损伤区氯离子扩散系数相对于未冻融损伤区大,氯离子在冻融损伤区传输速度相对要快。

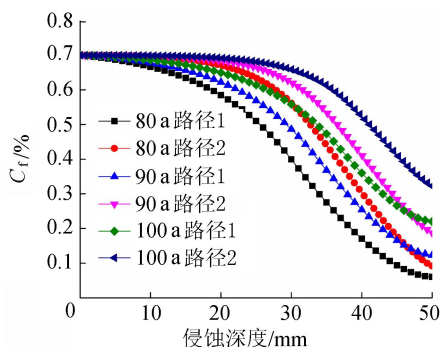


图 3 不同侵蚀年限沿不同侵蚀路径氯离子浓度分布

经过 100 a 氯离子侵蚀作用,构件中氯离子浓度分布见图 4。由图 4 可见,钢筋对氯离子的传输具有明显的阻滞效应,氯离子在靠近保护层一侧的钢筋表面累积,而远离保护层一侧钢筋表面会出现浓度迟滞现象。按构件内是否设置钢筋两种情形,分别取相同位置处,即沿真实(或假想)钢筋表面圆周区域取混凝土内的氯离子累积浓度进行对比分析,如图 5 所示(横轴 0 度指的是钢筋离混凝土侧表面最近处,并沿混凝土上表面方向展开),可知钢筋存在与否,同一深度处氯离子浓度差异较大,钢筋的阻滞效应显著,如不考虑将导致计算浓度偏小,使寿命预测偏于不安全。

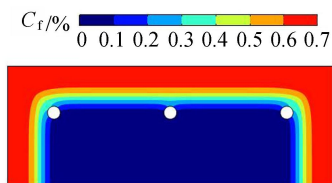


图 4 服役 100 a 构件内氯离子浓度分布

如图 6 显示了服役 60 a、70 a、80 a、和 90 a 的角区和非角区钢筋表面氯离子浓度分布。由图 6 可见,角区较非角区钢筋表面氯离子浓度峰值更高,且角区和非角区钢筋表面氯离子浓度峰值随侵蚀时间延长而增大;非角区钢筋表面的氯离子浓度分布较为稳定,总体呈椭圆形,浓度峰值始终保持在距构件

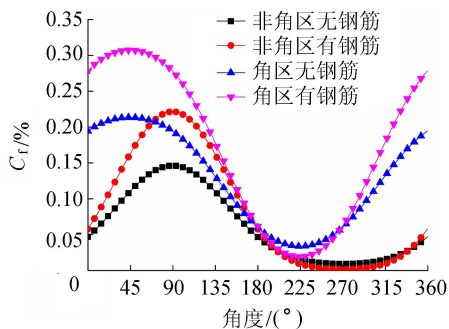


图 5 服役 100 a 钢筋表面氯离子浓度

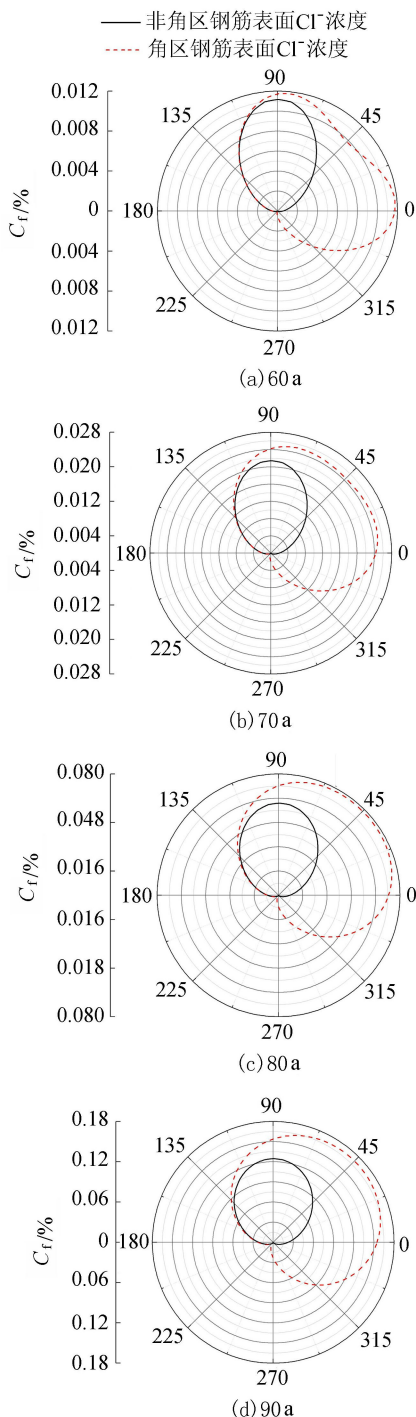


图 6 不同服役时间钢筋表面氯离子浓度极坐标分布

表面最近处;而角区钢筋表面氯离子浓度的分布却是随时间变化的,早期近似呈心形,即浓度峰值在钢筋距构件正、侧面最近处,后期浓度峰值逐渐转移至对角区域,总体分布形状呈斜向椭圆形。

其他条件相同,将考虑和不考虑冻融损伤计算的服役年限进行了对比,见图7。由图7可见,当不考虑冻融损伤的影响,青岛海湾大桥桥墩混凝土角区钢筋和非角区钢筋表面氯离子浓度峰值 C_{fmax} 分别在 132 a 和 157 a 达到钢筋锈蚀的临界氯离子浓度;当考虑冻融损伤的影响,角区钢筋和非角区钢筋分别在 82.5 a 和 86.8 a 达到钢筋锈蚀的临界氯离子浓度,可见两者结果差异较大。因此对于北方寒冷海洋环境钢筋混凝土结构锈蚀寿命预测,冻融损伤是十分重要的影响因素,不可忽略。

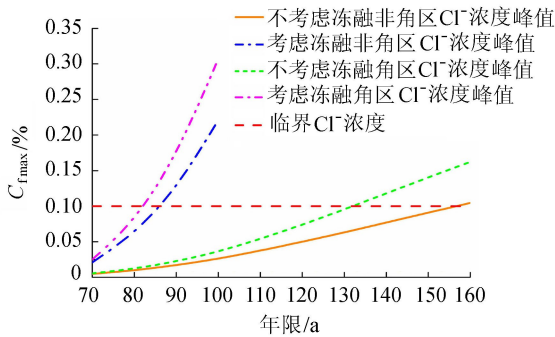


图7 冻融损伤对服役年限的影响

4 结论

a. 冻融损伤是影响寒区海洋环境钢筋混凝土结构锈蚀寿命的重要因素,采用本文提出的模型可以较真实地模拟该环境下氯离子在混凝土中的传输和预测结构寿命。

b. 氯盐侵蚀环境中,混凝土构件内的钢筋对氯离子的传输进程及其浓度分布存在影响,氯离子在钢筋的迎侵蚀面累积,在背侵蚀面浓度迟滞,且角区比非角区钢筋表面氯离子浓度峰值高。

c. 非角区钢筋表面氯离子浓度分布较为稳定,总体呈椭圆形,浓度峰值始终保持在距构件表面最近处;而角区钢筋表面氯离子浓度的分布却随时间变化,早期近似呈心形,即浓度峰值在钢筋距构件正、侧面最近处,后期浓度峰值逐渐转移至对角区域,总体分布形状呈斜向椭圆形。

d. 较无冻融氯盐侵蚀环境而言,其他条件相同时,经历冻融循环作用后混凝土结构的锈蚀寿命显著降低,且构件内角区与非角区钢筋锈蚀寿命的差异明显增大。

参考文献:

[1] XI Y P, BAŽANT Z P. Modeling chloride penetration in

saturated concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(1): 58-65.

[2] ABABNEH A, BENBOUDJEMA F, XI Y. Chloride penetration in nonsaturated concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(2):183-191.

[3] 金伟良,张奕,卢振勇. 非饱和状态下氯离子在混凝土中的渗透机理及计算模型[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(10): 1362-1369. (JIN Weiliang, ZHANG Yi, LU Zhenyong. Mechanism and mathematic modeling of chloride permeation in concrete under unsaturated state [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(10):1362-1369. (in Chinese))

[4] 李春秋,李克非. 干湿交替下表层混凝土中氯离子传输:原理、试验和模拟[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(4): 581-589. (LI Chunqiu, LI Kefei. Chloride ion transport in cover concrete under drying-wetting cycles: theory, experiment and modeling [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(4): 581-589. (in Chinese))

[5] XU Gang, LI Yunpan, SU Yibiao, et al. Chloride ion transport mechanism in concrete due to wetting and drying cycles[J]. Structural Concrete, 2015, 16(2): 298-296.

[6] PAUL S K, CHAUDHURI S, BARAI S V. Chloride diffusion study in different types of concrete using finite element method (FEM) [J]. Advances in Concrete Construction, 2014, 2(1): 39-56.

[7] 薛鹏飞,项贻强. 修正的氯离子在混凝土中的扩散模型及其工程应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(4): 831-836. (XUE Pengfei, XIANG Yiqiang. Corrected diffusion model of chloride in concrete and its engineering application [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(4): 831-836. (in Chinese))

[8] 彭国军,郑建军,周颖琼. 考虑骨料形状时混凝土氯离子扩散系数预测的数值方法[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6): 13-16. (PENG Guojun, ZHENG Jianjun, ZHOU Yingqiong. A numerical method for predicting the chloride diffusion coefficient of concrete with aggregate shape[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6):13-16. (in Chinese))

[9] ZALKUTTI W A S. Simulation of chloride transport in concrete with stress induced damage[D]. Saudi Arabia: King Fahd University of Petroleum and Minerals, 2011.

[10] 徐港,李运攀,王谊敏,等. 干湿交替环境下氯离子在承压混凝土内的传输特性[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 727-732. (XU Gang, LI Yunpan, WANG Yimin, et al. Transportation of chloride ion in sustained-load concrete under dry-wet cycles [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 727-732. (in Chinese))

[11] 杨绿峰,蔡荣,余波. 海洋大气区混凝土表面氯离子浓度的形成机理和多因素模型[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 46-55. (YANG Lufeng, CAI Rong, YU Bo. Formation mechanism and multi-factor model for surface chloride concentration of concrete in marine

- atmosphere zone [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(12): 46-55. (in Chinese))
- [12] AKIYAMA M, FRANGOPOL D M, SUZUKI M. Integration of the effects of airborne chlorides into reliability-based durability design of reinforced concrete structures in a marine environment [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2012, 8(2): 125-134.
- [13] 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): 8-13. (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 and Environmental Engineering, 2010, 32(3): 8-13. (in Chinese))
- [14] 蒋林华, 白舒雅, 徐金霞, 等. 钢筋锈蚀氯离子临界浓度研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 77-82. (JIANG Linhua, BAI Shuya, XU Jinxia, et al. Review on research of threshold chloride concentration of reinforcing steel corrosion in concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 77-82. (in Chinese))
- [15] 周华新, 张倩倩, 刘建忠, 等. 混凝土中引起钢筋锈蚀的临界氯离子浓度的研究[J]. 混凝土, 2015(12): 13-16. (ZHOU Huaxin, ZHANG Qianqian, LIU Jianzhong, et al. Study of chloride threshold level for corrosion of steel in concrete [J]. Concrete, 2015(12): 13-16. (in Chinese))
- [16] HONG K, HOOTON R D. Effects of cyclic chloride exposure on penetration of concrete cover [J]. Cement & Concrete Research, 1999, 29(9): 1379-1386.
- [17] MARTIN-PEREZ B, ZIBARA H, HOOTON R D, et al. A study of the effect of chloride binding on service life predictions [J]. Cement & Concrete Research, 2000, 30(8): 1215-1223.
- [18] ISHIDA T, IQBAL P O, ANH H T L. Modeling of chloride diffusivity coupled with non-linear binding capacity in sound and cracked concrete [J]. Cement & Concrete Research, 2009, 39(10): 913-923.
- [19] 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): 75-83.
- [20] EHLEN M A, THOMAS M D A, BENTZ E C. Life-365 service life prediction Model Version 2.0 [J]. Concrete International, 2009, 31(5): 41-46.
- [21] MANGAT P S, MOLLOY B T. Prediction of long term chloride concentration in concrete [J]. Materials & Structures, 1994, 27(6): 338-346.
- [22] 朱方之. 受冻融混凝土耐久性及其荷载耦合下钢筋混凝土黏结性能研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [23] 孙丛涛. 基于氯离子侵蚀的混凝土耐久性与寿命预测研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [24] 何世钦. 氯离子环境下钢筋混凝土构件耐久性性能试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- [25] PETCHERDCHOO A. Time dependent models of apparent diffusion coefficient and surface chloride for chloride transport in fly ash concrete [J]. Construction & Building Materials, 2013, 38(1): 497-507.
- [26] 关斌, 牛获涛, 肖前慧, 等. 气冻气融作用下混凝土抗冻性及损伤层演化规律研究 [J]. 铁道学报, 2017, 39(3): 112-119. (GUAN Xiao, NIU Ditaio, XIAO Qianhui, et al. Study on frost resistance of concrete and evaluation law of concrete damage layer thickness under air-freezing and air-thawing [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(3): 112-119. (in Chinese))
- [27] 李金玉, 彭小平, 邓正刚, 等. 混凝土抗冻性的量化设计 [J]. 混凝土, 2000(12): 61-65. (LI Jinyu, PENG Xiaoping, DENG Zhenggang, et al. Quantitative design on the frost-resistance of concrete [J]. Concrete, 2000(12): 61-65. (in Chinese))
- [28] 李晔, 姚祖康, 孙旭毅, 等. 铺面水泥混凝土冻融环境量化研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(10): 1408-1412. (LI Ye, YAO Zukang, SUN Xuyi, et al. Quantification research on the frost environment of pavement cement Concrete [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(10): 1408-1412. (in Chinese))
- [29] 刘卫民, 竺存宏, 韩玉. 混凝土中氯离子扩散引起钢筋锈蚀过程的研究 [J]. 水道港口, 1992(2): 30-38. (LIU Weimin, ZHU Cunhong, HAN Yu. Study on steel bar rust caused by chlorion diffusion in concrete [J]. Journal of Waterway and Harbor, 1992(2): 30-38. (in Chinese))
- [30] 张云清, 余红发, 王甲春. 盐冻条件下混凝土结构表面的损伤规律研究 [J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 57-63. (ZHANG Yunqing, YU Hongfa, WANG Jiachun. Study of surface damage rule of concrete structure exposed to salt freezing condition [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 57-63. (in Chinese))
- [31] 张峰, 蔡建军, 李树忱, 等. 混凝土冻融损伤厚度的超声波检测 [J]. 深圳大学学报(理工版), 2012, 29(3): 207-210. (ZHANG Feng, CAI Jianjun, LI Shuchen, et al. Ultrasonic detection of freeze-thaw damage thickness of concrete [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2012, 29(3): 207-210. (in Chinese))
- [32] 贾超, 纪圣振, 张峰. 冻融作用对混凝土跨海大桥桥墩稳定性影响研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(3): 7-13. (JIA Chao, JI Shengzhen, ZHANG Feng. Study on the stability of concrete bay bridge pier under freeze-thaw action [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(3): 7-13. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-07-24 编辑: 雷燕)