

冻融-干湿作用下装配式结构节点部位的氯离子传输特性

包龙生¹,赵家康²,李练武¹,包宇扬³,杨宇豪⁴

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;3. 沈阳大学应用技术学院,辽宁 沈阳 110044;
4. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院,辽宁 沈阳 110870)

摘要 目的 研究冻融-干湿循环作用下装配式混凝土结构节点部位的氯离子传输特性,为北方寒区装配式结构的发展提供理论基础。方法 在 Fick 第二定律的基础上推导氯离子在扩散和冻融作用下的偏微分方程,建立数值模型模拟冻融与氯盐干湿侵蚀交替作用下氯离子在装配式混凝土结构节点部位的传输过程。结果 在冻融-干湿循环作用下氯离子逐渐向混凝土内部扩散,随着侵蚀深度的增加,氯离子质量分数逐渐降低;在侵蚀深度 10 mm 处,冻融-干湿循环 50 次后的氯离子质量分数为 0.246%,可以发现经历 100 次、150 次、200 次、250 次、300 次循环后,节点部位氯离子质量分数分别较经历 50 次循环增加了 66.3%、99.2%、134.6%、164.2%、173.6%。结论 节点与其他部位相比受到氯离子的侵蚀作用更强;随着冻融-干湿循环次数的增加,氯离子质量分数增速放缓,各部位冻融破坏程度均增加。

关键词 装配式混凝土结构;节点;干湿循环;冻融循环;氯离子;Fick 第二定律

中图分类号 TU528.01

文献标志码 A

Chloride Transport Properties at Joints of Prefabricated Structures under Freeze-Thaw-Dry-Wet Cycles

BAO Longsheng¹, ZHAO Jiakang², LI Lianwu¹, BAO Yuyang³, YANG Yuhao⁴

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;
2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. School of Applied Technology, Shenyang University, Shenyang, China, 110044; 4. School of Architectural and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, China, 110870)

Abstract: The chloride transport characteristics at joints of prefabricated concrete structures under

收稿日期:2022-03-17

基金项目:“十三五”国家重点研发计划重点专项基金项目(2018YFC0809600,2018YFC0809606);辽宁省重点研发计划基金项目(2018416028);沈阳市建委城乡系统科研项目(201904);沈阳市科技计划项目(21-108-9-13)

作者简介:包龙生(1971—),男,教授,博士,主要从事桥梁工程结构等方面研究。

freeze - thaw - dry - wet cycles are studied to provide a theoretical basis for the development of prefabricated structures in the northern cold regions. Based on the Fick's second law, the partial differential equation of chloride ion under the action of diffusion and freeze - thaw is deduced. The finite element analysis software is used to simulate the transmission process of chloride ion at the joints of prefabricated concrete structures under the alternating action of freeze - thaw and chloride dry-wet erosion. The results show that under the action of freeze - thaw - dry - wet cycles, chloride ion gradually diffuses into the concrete, and its mass fraction gradually decreases with the increase of erosion depth. At the erosion depth of 10 mm, the mass fraction of chloride ion after 50 freeze - thaw - dry - wet cycles is 0.246%. It can be found that after 100, 150, 200, 250, and 300 cycles, respectively, the mass fraction of chloride ion at the joints is higher than that of the experienced 50 cycles increased by 66.3%, 99.2%, 134.6%, 164.2% and 173.6%, respectively. The joints are more severely corroded by chloride ion than other parts. With the increase of freeze - thaw - dry - wet cycles, the growth rate of chloride ion mass fraction slows down, and the degree of freeze - thaw damage in each part increases.

Key words: prefabricated concrete structure; joints; dry - wet cycles; freeze - thaw cycles; chloride ion; Fick's second law

装配式混凝土结构作为混凝土结构的一种,不同节段间采用灌浆套筒等连接器连接,节点接缝处采用坐浆料进行封闭,存在着物理不连续的界面区,使得装配式结构的节点部位更容易发生破坏^[1]。国内外学者研究发现,冻融循环、氯盐侵蚀、碳化、钢筋锈蚀是寒区桥梁最常见的耐久性退化因素^[2],其中由氯盐侵蚀引起的钢筋锈蚀和冻融循环引起的剥蚀作用两者耦合造成的结果最为严重^[3]。氯盐进入混凝土的方式一般有两种:一种是混凝土材料在拌和时自身所携带的氯盐;另一种是大气中氯离子扩散并渗透到混凝土^[4-5]。冻融损伤对混凝土中氯化物的传输有促进作用,浅层与深层的氯离子质量分数呈现相反的趋势^[6-8]。洪锦祥等^[9]对氯盐侵蚀扩散与冻融作用之间的关系进行了试验研究,结果表明冻融损伤破坏对氯盐侵蚀扩散系数和扩散深度都有较大影响。屈锋^[10]研究了冻融损伤对氯盐侵蚀的影响规律,分别建立了盐冻损伤与扩散系数和混凝土静弹性模量的微分方程。Q. F. Liu 等^[11]通过氯离子迁移方程,研究了冻融损伤、骨料、界面过渡区对混凝土和砂浆中氯化物扩散的影响。随着仿真软件的发展,学者们开始采用数值模拟的方法研究多物理场耦合情况下混

凝土内部氯化物的扩散行为。X. L. Du 等^[12]通过建立细观数值模型,研究了氯离子在混凝土内部的渗透规律,结果表明集料的形状和分布对混凝土中氯离子的渗透影响可以忽略。W. Zhou 等^[13]研究了热 - 水 - 力耦合作用下混凝土的冻融损伤规律,数值模拟结果表明界面过渡区水的渗透性对混凝土的抗冻性能影响较大。W. Q. Jiang 等^[14]通过建立数值模型,对冻融作用下混凝土内部氯化物的渗透程度进行了定量分析。

目前国内外关于氯离子传输特性的研究主要集中于现浇混凝土结构,而针对装配式结构的研究较少。我国北方寒区的装配式建筑如装配式混凝土桥梁长期遭受温差、除冰盐的影响,导致节点界面接缝处的混凝土、座浆料以及套筒内的灌浆料存在收缩、氯离子侵入等现象。针对装配式混凝土结构的特点,笔者对冻融 - 干湿循环作用下节点部位的氯离子传输特性进行了研究,推导冻融 - 干湿循环作用下氯离子迁移的偏微分方程,运用 COMSOL 软件建立冻融与氯盐侵蚀交替作用下的氯离子二维扩散模型,分析装配式混凝土结构节点部位的氯离子侵蚀规律,为北方寒冷地区装配式结构的大规模推广与应用提供理论支撑。

1 氯离子在扩散和冻融影响下迁移理论

国内外学者建立的氯离子传输模型大都是基于 Fick 第一、二定律,相应的稳态扩散方程、非稳态扩散方程如式(1)、(2)所示:

$$F = -D \cdot \text{grad} C. \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(D \cdot \text{grad} C). \quad (2)$$

式中: F 为单位面积氯离子扩散通量; D 为氯离子的扩散系数; C 为混凝土中氯离子的质量分数; grad 为标量的梯度; div 为矢量的散度。

冻融的影响可近似看作周期性的温度作用,运用类比方法,结合式(1)、式(2),建立考虑冻融影响的偏微分方程:

$$\begin{cases} F_{\text{FT}} = -D_{\text{FT}} \cdot \text{grad} C_{\text{FT}}; \\ \frac{\partial C_{\text{FT}}}{\partial t} = \text{div}(D_{\text{FT}} \cdot \text{grad} C_{\text{FT}}). \end{cases} \quad (3)$$

式中: F_{FT} 为氯离子在冻融影响下的迁移通量; D_{FT} 为冻融影响下的迁移系数; C_{FT} 为冻融迁移时氯离子的质量分数。

D_{FT} 为周期性的变化值,故引入相变影响函数 $N(t)$:

$$N(t) = \begin{cases} 1, & t_{\text{ref}} \leq t \leq t_{\text{ref}} + \Delta t; \\ 0, & \text{其他}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: t_{ref} 为一个冻融循环时间内,相变发生的参考时刻; Δt 为一个冻融循环周期 T 内,相变的持续时间。

将式(4)带入式(3)可得氯离子在冻融影响下的迁移方程:

$$\frac{\partial C_{\text{FT}}}{\partial t} = \text{div}(D_{\text{FT}} N(t) \cdot \text{grad} C_{\text{FT}}). \quad (5)$$

在不考虑混凝土材料对氯离子结合作用的前提下,建立同时考虑扩散和冻融作用的数学模型,结合式(2)与式(5)得:

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \text{div}(D_d \text{grad} C_f) + \text{div}(D_{\text{FT}} N(t) \text{grad} C_f). \quad (6)$$

从式(6)可以看出,扩散和冻融影响下的氯离子迁移形式相同,整理后如下:

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \text{div}(D_{\text{d-FT}} \text{grad} C_f). \quad (7)$$

式中: $D_{\text{d-FT}}$ 为自由氯离子在扩散和冻融耦合作用下的总迁移系数, $D_{\text{d-FT}} = D_d + D_{\text{FT}} N(t)$ 。

2 数值模拟

定义物理参数:使用 COMSOL 软件中的稀物质传递模块模拟氯离子在混凝土中的侵蚀过程,结合北方寒区装配式结构,如桥梁下部结构常用的混凝土强度等级,设定其为 C40,扩散和冻融试验中 NaCl 溶液质量分数为 5%^[15-16]。干湿循环周期设为 48 h^[17-18],干湿循环周期相同,干湿比为 5:1 时,氯离子向混凝土内传输的效率最高^[17]。为了更精确地模拟北方寒冷地区装配式混凝土结构中氯离子的传输行为,把式(7)作为稀物质运输模块的控制方程,主要用于稀物质传递瞬态条件下的求解。

定义边界条件:建立的模型共有 4 个边界,左边界为氯离子渗透方向,设置为狄利克雷边界条件,其余 3 个边界设置为模块默认的零通量边界,如式(8)所示:

$$C(0, t) = C_0, C(\infty, t) = C_s. \quad (8)$$

数值模拟针对氯离子单向扩散迁移过程进行研究,为了提高模拟结果的可视化程度,采用与一维模型等效的二维模型,以更为直观的云图形式显示计算结果。结合装配式混凝土结构节点部位氯离子的侵蚀扩散情况,建立尺寸为 100 mm × 100 mm 的氯离子侵蚀平面模型(见图 1),自动生成网格,并进行超细化。

计算方式:冻融-干湿循环为首先进行两次冻融循环,再进行 2 d 氯盐干湿循环。其中两次冻融循环时间为 7 h,NaCl 溶液的质量分数为 5%,温度为常温,干湿比为 5:1,冻融-干湿循环周期为 55 h。综合考虑扩散和冻融两个过程,可将式(7)中的氯离子扩

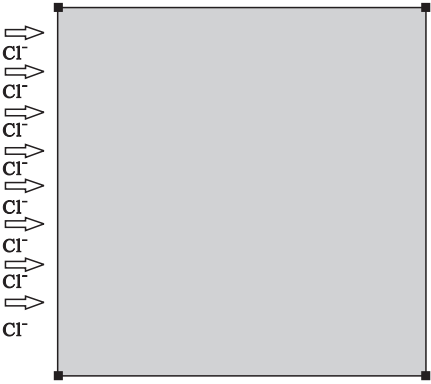


图1 模型示意图

Fig. 1 Model diagram

散与冻融耦合作用下总迁移系数 D_{d-FT} 表示成以干湿循环后的等效扩散系数 D_{eff} 和冻融迁移系数 D_{FT} 交替出现的类周期分段函数,如式(9)所示:

$$D_{d-FT} = \begin{cases} D_{eff}, t \in [55k, 55k + 48); \\ D_{FT}, t \in [55k + 48, 55k + 55]. \end{cases} \quad (9)$$

式中: D_{d-FT} 为总迁移系数; D_{eff} 为等效扩散系数; k 为冻融-干湿循环次数。

冻融-干湿循环次数设为0次、25次、50次、100次、150次、200次、250次、300次,完成模块相应设置。结合文献[19-20]中的氯离子侵蚀试验数据,表面氯离子质量分数为1.418%,氯离子等效扩散系数为 $3.144 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,装配式结构的氯离子侵蚀试验表明,连接界面区氯离子的等效扩散系数约为现浇混凝土的1.35倍^[21],因此装配式结构节点部位的氯离子等效扩散系数为 $4.244 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,冻融迁移系数根据式(10)确定:

$$D_{FT}(n) = \frac{1}{3} (348.778 e^{-0.5411n} + 450.639 e^{-0.8335n} + 257.139 e^{-0.5983n}). \quad (10)$$

式中: D_{FT} 为修正后的混凝土中冻融迁移系数; n 为正则化冻融循环次数, $n = N/25$ 。

3 模拟结果及分析

3.1 冻融-干湿循环下节点部位的氯离子质量分数

不同冻融-干湿循环次数下装配式混凝土

土结构节点部位的氯离子质量分数云图如图2所示。氯离子从最左边开始侵蚀,以不同的深浅颜色显示氯离子质量分数(氯离子质量占胶凝材料质量的百分比)。

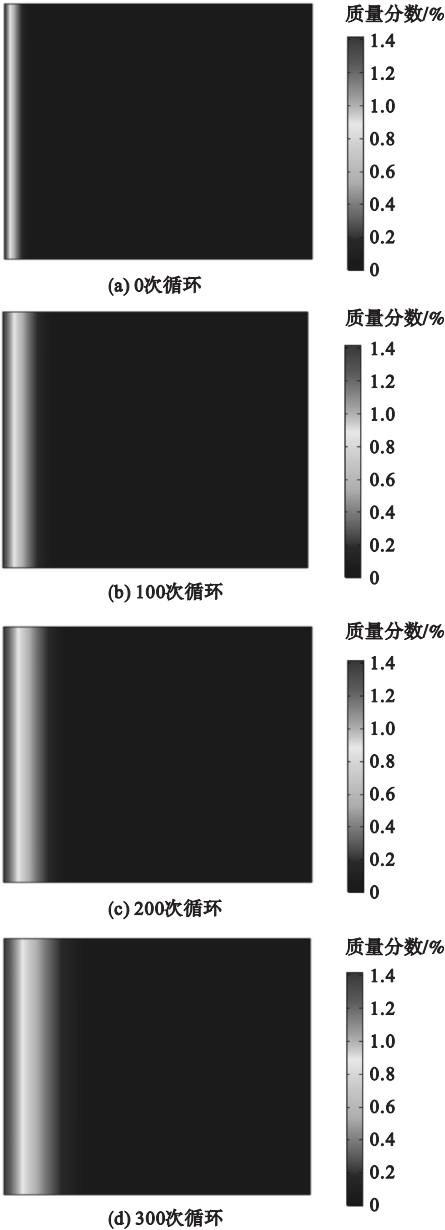


图2 装配式结构节点部位的氯离子质量分数云图
Fig. 2 Chloride ion mass fraction plots of joints of the prefabricated structures

观察图2氯离子质量分数云图可知,云图左侧颜色最深,表明随着氯离子侵蚀深度的增加,氯离子质量分数逐渐变小。云图左侧深色区域随着冻融-干湿循环次数的增加

而增大,说明侵蚀表面层的氯离子质量分数逐渐增大,且表面层的氯离子逐渐向深处迁移,在冻融-干湿作用下,结构内部的损伤逐渐严重。

在混凝土表面0~5 mm内,氯离子质量分数随侵入深度逐渐升高,在侵蚀面浅层范围内会存在一个狭小的对流区,一部分氯离子通过对流作用进入该区域^[18]。为了消除对流作用造成的干扰,数据的采集位置以侵蚀深度5.0 mm处为起点,侵蚀深度30.0 mm处为终点,采集间隔为2.5 mm。将图2结果整理绘制成三维立体图进行对比分析,不同冻融-干湿循环作用下各侵蚀深度处氯离子质量分数如图3所示。

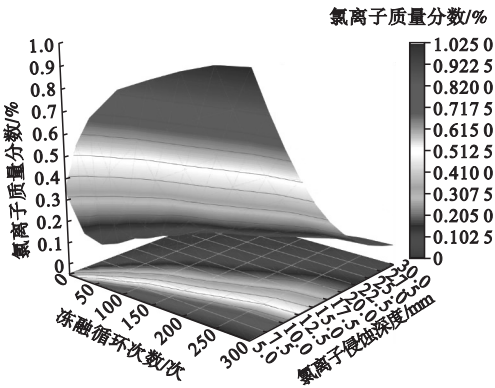


图3 冻融-干湿循环下各侵蚀深度处氯离子质量分数

Fig.3 Chloride ion mass fraction at each erosion depth under freeze - thaw - dry - wet cycles

由图3可以看出,积聚在混凝土表面的氯离子质量分数最大,随着扩散深度的增加,其值逐渐减小。当侵蚀深度为10 mm时,初始氯离子质量分数为0.03%,在交替模拟50次后发现氯离子质量分数为0.246%,在经过更多次的冻融-干湿循环时,氯离子质量分数持续增加,最终维持在一定水平,可以发现经历100次、150次、200次、250次、300次循环后,氯离子质量分数分别为0.409%、0.490%、0.577%、0.650%、0.673%,较经历50次循环增大了66.3%、99.2%、134.6%、164.2%、173.6%。表明同一侵蚀深度下,随

着冻融-干湿循环次数的逐渐增加,同一侵蚀深度范围内的氯离子质量分数首先迅速增加,之后趋于平缓,最终维持在一定范围。节点部位的氯离子质量分数受冻融-干湿的影响在初期比较明显,随着冻融-干湿循环次数的增加,对节点部位氯离子扩散的促进作用在逐渐减弱。

冻融-干湿循环前期,如50次循环之前,混凝土浅层区域氯离子质量分数增长很快,当侵蚀深度达到20 mm时,氯离子质量分数很低,可忽略不计。当达到150次循环时,距混凝土表面5 mm处的氯离子质量分数为0.904%,在7.5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm深度范围内的氯离子质量分数分别为0.680%、0.490%、0.223%、0.085%、0.027%、0.008%,分别较5 mm处的氯离子质量分数减少了24.8%、45.8%、75.3%、90.6%、97.0%、99.1%。值得注意的是,此时20 mm深度范围的氯离子质量分数接近规范限值^[22-23]。在交替模拟次数达到300次时,氯离子质量分数趋于稳定,此侵蚀深度下装配式混凝土结构的节点部位侵蚀状况与遭受250次作用的区别不大,但在25 mm深度范围内的氯离子质量分数已超出规范限值。表明在冻融-干湿循环前期,节点部位受到较强的侵蚀作用,随着冻融-干湿循环次数的增加,试件受到的冻融破坏程度增强,导致混凝土深层区域的氯离子质量分数逐渐增加,超出了限值,在冻融-干湿循环后期,混凝土不同深度范围内的氯离子质量分数逐渐趋于稳定。

3.2 冻融-干湿循环下节点部位氯离子质量分数变化率

结合数值模拟结果,得到不同冻融-干湿循环次数下装配式混凝土结构节点部位各侵蚀深度处的氯离子质量分数变化率(见图4)。由图4可以看出,氯离子的侵蚀深度为10 mm时,节点部位遭受0~25次冻融-干湿循环,氯离子质量分数的平均变化率为

4.36%,随着冻融-干湿循环次数的增加,当节点部位遭受 25~50、50~100、100~150、150~200、200~300 次时,氯离子质量分数的平均变化率分别为 4.28%、6.52%、1.62%、1.74%、0.96%,较经历 0~25 次循环减小了 1.8%、-49.5%、62.8%、60.1%、77.9%。表明随着冻融-干湿次数的增加,装配式混凝土结构节点部位同一侵蚀深度处的氯离子质量分数变化率存在一定的离散性。

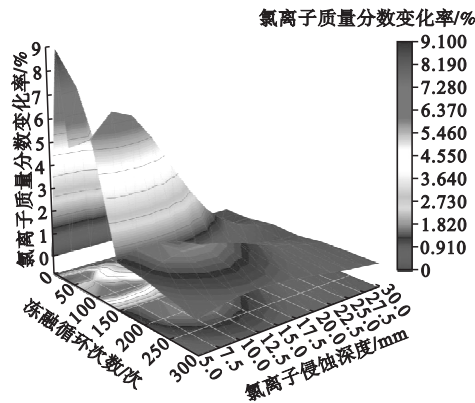


图 4 冻融-干湿循环下各侵蚀深度处氯离子质量分数变化率

Fig. 4 Change rate of chloride ion mass fraction at each erosion depth under freeze-thaw-dry-wet cycles

当节点部位遭受 100~150 次冻融-干湿循环时,在 7.5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm 侵蚀深度处,氯离子质量分数的平均变化率分别为 1.58%、1.62%、1.14%、0.58%、0.22%、0.08%。表明节点部位在冻融-干湿循环影响下,随着侵蚀深度的增加,氯离子质量分数的变化率越来越小,最终趋近于 0,使氯离子质量分数维持在一定范围。

4 结 论

(1)靠近侵蚀表面的混凝土层受到的盐冻剥蚀作用较严重,随着冻融-干湿循环次数的增加,氯离子逐渐向内扩散。冻融与干湿循环相耦合导致氯离子扩散系数增大,从

而增加了氯离子向内部迁移的速率。

(2)同一侵蚀深度下,随着冻融-干湿循环次数的增加,装配式混凝土结构节点部位氯离子质量分数开始迅速增加,之后趋于平缓,最终维持在一定范围。

(3)相同冻融-干湿循环次数时,不同侵蚀深度范围内,装配式混凝土结构节点部位的氯离子质量分数平均变化率在逐渐变小,最终趋近于 0。

(4)随着冻融-干湿循环次数的增加,氯离子侵蚀深度在逐渐增加,与普通混凝土结构相比,相同条件下装配式混凝土结构中节点部位的氯离子侵蚀深度更远,且传输特性更加复杂,当氯离子的侵蚀深度大于保护层厚度时,钢筋锈蚀的概率大大增加。

参考文献

[1] 包龙生,王贺鑫,汤维维,等.采用榫卯剪力键的预应力装配式双柱桥墩拟静力分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(4):692-702.
(BAO Longsheng, WANG Hexin, TANG Weiwei, et al. Pseudo static analysis of assembly type double column pier based on ABAQUS [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34 (4): 692 - 702.)
[2] 谢小利.混凝土中氯离子的扩散和分布行为及其影响因素研究[D].南宁:广西大学,2020.
(XIE Xiaoli. Study on diffusion and distribution of chloride ions in concrete and its influencing factors [D]. Nanning: Guangxi University, 2020.)
[3] 郝潞岑,刘元珍,高宇璇,等.氯盐侵蚀和冻融循环耦合作用下保温混凝土的耐久性[J].广西大学学报(自然科学版),2018,43(4):1562-1568.
(HAO Lucen, LIU Yuanzhen, GAO Yuxuan, et al. Durability of thermal insulation concrete under coupled action of chloride salt erosion and freeze-thaw cycles [J]. Journal of Guangxi university (natural science edition), 2018, 43(4):1562-1568.)
[4] ZHANG J, JING Z, ZHANG Y, et al. Instantaneous chloride diffusion coefficient and its time dependency of concrete exposed to a marine tidal environment [J]. Construction and building materials, 2018, 167: 225-234.
[5] COLLEPARDI M, MARCIALIS A, TURRIZIANI R. Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes [J]. Journal of the

- American ceramic society, 1972, 55 (10): 534-535.
- [6] ZHANG P, CONG Y, VOGEL M, et al. Steel reinforcement corrosion in concrete under combined actions: The role of freeze-thaw cycles, chloride ingress, and surface impregnation [J]. Construction and building materials, 2017, 148: 113-121.
- [7] 包龙生, 赵家康, 张攀, 等. 装配式混凝土桥墩节点的抗冻性能研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2022, 47(6): 1459-1470.
(BAO Longsheng, ZHAO Jiakang, ZHANG Pan, et al. Research on frost resistance of prefabricated concrete pier joints [J]. Journal of Guangxi university (natural science edition), 2022, 47(6): 1459-1470.)
- [8] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理(Ⅱ): 冻融饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 741-746.
(YANG Quanbing. One of mechanisms on the deicer-Frost scaling of concrete(Ⅱ): degree of saturation and ice-formation pressure during freezing-thawing cycles [J]. Journal of building materials, 2012, 15(6): 741-746.)
- [9] 洪锦祥, 缪昌文, 刘加平, 等. 冻融损伤混凝土力学性能衰减规律[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 173-178.
(HONG Jinxiang, MIAO Changwen, LIU Jiaping, et al. Degradation law of mechanical properties of concrete subjected to freeze-thaw cycles [J]. Journal of building materials, 2012, 15(2): 173-178.)
- [10] 屈锋. 盐冻环境下混凝土构件耐久性 & 寿命预测研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
(QU Feng. Durability study and service life prediction of reinforced concrete specimens under salt frozen environment [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2014.)
- [11] LIU Q F, EASTERBROOK D, YANG J, et al. A three-phase, multi-component ionic transport model for simulation of chloride penetration in concrete [J]. Engineering structures, 2015, 86: 122-133.
- [12] DU X, JIN L, MA G. A meso-scale numerical method for the simulation of chloride diffusivity in concrete [J]. Finite elements in analysis and design, 2014, 85: 87-100.
- [13] ZHOU W, ZHAO C, LIU X, et al. Mesoscopic simulation of thermo-mechanical behaviors in concrete under frost action [J]. Construction and building materials, 2017, 157: 117-131.
- [14] JIANG W, SHEN X, XIA J, et al. A numerical study on chloride diffusion in freeze-thaw affected concrete [J]. Construction and building materials, 2018, 179: 553-565.
- [15] 曹卫群. 干湿交替环境下混凝土的氯离子侵蚀与耐久性防护[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
(CAO Weiqun. Chloride transport and cover protection of concrete under drying-wetting cycles [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2013.)
- [16] 鲍玖文, 庄智杰, 张鹏, 等. 基于相似性的海洋潮汐区环境混凝土抗氯盐侵蚀性能研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(7): 7087-7095.
(BAO Jiuwen, ZHUANG Zhijie, ZHANG Peng, et al. Research progress of chloride corrosion resistance of concrete exposed to marine tidal environment based on similarity theory [J]. Materials reports, 2021, 35(7): 7087-7095.)
- [17] 徐港, 徐可, 苏义彪, 等. 不同干湿制度下氯离子在混凝土中的传输特性[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1): 54-59.
(XU Gang, XU Ke, SU Yibiao, et al. Transport characteristics of chloride ion in concrete under dry-wet cycles [J]. Journal of building materials, 2014, 17(1): 54-59.)
- [18] 庞超明, 徐剑, 王进, 等. 混凝土干湿过程及循环制度的研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 315-320.
(PANG Chaoming, XU Jian, WANG Jin, et al. Investigation of the process and regime of drying and wetting of concrete [J]. Journal of building materials, 2013, 16(2): 315-320.)
- [19] 曹杰. 冻融循环对混凝土中氯离子迁移影响模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
(CAO Jie. Modeling study on the influence of cyclic freeze-thaw on chloride ion migration in concrete [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.)
- [20] 李昕宸. 混凝土冻融循环与氯离子侵蚀耦合效应的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
(LI Xincheng. An experimental study on the coupling effect of freeze-thaw cycle and chloride ion erosion in concrete [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.)
- [21] 罗小雅. 装配整体式混凝土结构连接界面区氯离子传输特性[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
(LUO Xiaoya. Characteristics of chloride penetration in interfacial zones of assembled monolithic concrete structures [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.)
- [22] 中国土木工程学会. 混凝土结构耐久性设计与施工指南: CCES 01—2004 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
(China Civil Engineering Society. Guide to durability design and construction of concrete structures: CCES 01—2004 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.)
- [23] 艾志勇, 舒小平, 荣耀, 等. 混凝土钢筋锈蚀防治技术研究与应用进展评述[J]. 材料保护, 2020, 53(9): 107-113.
(AI Zhiyong, SHU Xiaoping, RONG Yao, et al. A review on research and application status on corrosion prevention technologies of steel in concrete [J]. Materials protection, 2020, 53(9): 107-113.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)