

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.005



带裂缝混凝土氯离子扩散作用试验研究 及数值模拟

张希瑾¹, 田稳苓¹, 王浩宇¹, 卿龙邦^{1,2}

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300401)

(2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:为了准确评估带裂缝工作混凝土结构的耐久性能,针对氯离子在带裂缝混凝土中的扩散过程进行研究。提出了无损制备裂缝的方法,可高效易行地在混凝土侧面及内部产生裂缝。对带裂缝的水泥砂浆试件进行氯盐溶液浸泡试验,深入研究了单缝和双缝试件中氯离子的扩散作用,修正了氯离子的扩散系数,并对带裂缝混凝土的氯离子扩散过程进行了数值模拟。研究表明:氯离子会沿裂缝发展方向及垂直于裂缝发展方向扩散,随着水灰比的减小,砂浆试件的抗氯离子扩散性能明显提高,在一定范围内,当裂缝间距增大,双缝间的氯离子扩散交互影响作用明显减小,ANSYS 软件的模拟结果与试验数据吻合良好。

关键词:混凝土;裂缝;氯离子;扩散试验;数值模拟

中图分类号:TU528.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)02-0035-08

Experimental analysis and numerical simulation of chloride ion diffusion in concrete with cracks

Zhang Xijin¹, Tian Wenling¹, Wang Haoyu¹, Qing Longbang^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 30040, P. R. China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China)

Abstract: Process of chloride ion diffusion in concrete with cracks is studied to accurately assess durability performance of concrete structure with cracks. Preparation of cracks with nondestructive method is proposed, which can produce cracks in internal concrete or on its side face effectively. Chlorine salt solution immersion experiments on the concrete with cracks is conducted. It is studied on the chloride ion diffusion effect of specimen with single slit and double slits, and revised chloride ion diffusion coefficient, and simulating chloride ion diffusion process of concrete with cracks. Research results show that the chloride ion diffusion will occur along or perpendicular to the cracking direction, and decreasing of the water cement ratio, resistivity to chloride ion diffusion in cement mortar specimens increased significantly. In a specific

收稿日期:2016-06-05

基金项目:国家自然科学基金(51309073);河北省交通运输厅科技计划(Y-2012047)

作者简介:张希瑾(1992-),女,主要从事混凝土结构与新型建筑材料研究,(E-mail)13920725855@163.com.

田稳苓(通信作者),女,教授,博士生导师,(E-mail)1241821910@qq.com.

Received:2016-06-05

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51309073); Science and Technology Project of Department of Transportation, Hebei(No. Y-2012047)

Author brief: Zhang Xijin (1992-), main research interests: concrete and new building materials, (E-mail) 13920725855@163.com.

Tian Wenling(corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail)1241821910@qq.com.

range, increasing cracks spacing, the chloride ion diffusion interaction between double slits obviously decreases. And simulation results in ANSYS are in good agreement with those data obtained in test.

Keywords: concrete; cracks; chloride ion; diffusion test; numerical simulation

中国的基础设施建设现正处于高峰期,其中已暴露出大量的结构耐久性问题。氯离子扩散作用所造成的钢筋锈蚀在整个耐久性问题中尤为严重。混凝土结构会在温度效应、体积收缩及荷载等作用下产生裂缝,加速保护层混凝土的失效进程,使钢筋遭受腐蚀,进而降低混凝土结构的耐久性。通过研究氯离子在带裂缝混凝土结构内的扩散过程来预测内部钢筋的脱钝时间,可以为结构的耐久性评估提供方便,具有十分重要的现实意义。

学者们通过对浸泡条件下氯离子在带裂缝混凝土中的扩散过程研究,得出了以下结论:相同侵蚀时间内,裂缝处的氯离子浓度显著增加,侵蚀一定时间后,垂直裂缝路径的氯离子浓度分布与暴露表面向混凝土内氯离子扩散过程的分布十分相似^[1-5]。张君等^[6]研究表明,短期侵蚀作用下,裂缝处的氯离子浓度与裂缝宽度有关,而长期侵蚀作用下,裂缝处氯离子浓度受裂缝宽度的影响较小。氯离子在混凝土中的扩散速度小于其在裂缝中的速度,裂缝曲折性对氯离子扩散过程造成的影响不明显^[7-8]。Takewaka 等^[9]研究表明,当裂缝宽度小于 0.05 mm 时,裂缝对氯离子的扩散系数影响很小;在 0.05~0.1 mm 之间时,扩散系数能够增长 10 倍;大于 0.1 mm 时,扩散系数还会大幅增加。另外一些学者研究发现,裂缝内的氯离子扩散系数随着裂缝宽度的变化存在上下限值^[10-13],其中,上限为氯离子在水中的扩散系数,下限为氯离子在相应混凝土内的扩散系数。延永东等^[14]对已有文献中的试验结果进行了总结,得出了裂缝宽度在 0.03~0.125 mm 之间氯离子扩散系数的计算公式。

目前,制备带裂缝混凝土的方法有一定的局限性,关于带裂缝混凝土中氯离子扩散机理方面的研究还不够完善。笔者提出了无损制备裂缝的方法,通过氯盐溶液浸泡试验方法,研究裂缝宽度及裂缝深度对单缝试件及裂缝间距对双缝试件氯离子扩散过程的影响,修正氯离子扩散系数,利用 ANSYS 模拟氯离子扩散过程,并将其结果与试验数据进行对比。

1 氯盐溶液浸泡试验

1.1 试件的制备

试验采用水泥砂浆制作试件。相比混凝土,水泥砂浆较均匀,有利于观察试验结果及数值模拟。试验中单缝试件的裂缝宽度为 0.2 mm、深度为 40 mm;双缝试件的裂缝宽度为 0.2 mm、深度为 50 mm,裂缝间距分别为 10、20 及 30 mm,砂浆配合比见表 1。

表 1 砂浆配合比

Table 1 Mix proportions of mortar

水灰比	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	28 d 抗压强度 平均值/MPa
0.4	735	1 470	294	54.0
0.5	714	1 428	357	45.2
0.6	694	1 388	417	33.4

1.2 无损制备裂缝方法

提出的无损制备裂缝方法及试验装置可高效易行地在混凝土侧面及内部产生裂缝,不仅解决了产生裂缝方法的局限性,还可以改变试模的尺寸、形状及钢片的宽度和厚度。

试验定做不同尺寸的高强度、高韧性不锈钢钢片,并通过图 1 所示的试验装置将钢片固定。在试件浇注 24 h 后脱模,养护至龄期后,使用电子万能试验机将钢片小心拔出,已拆除钢片的带裂缝混凝土试件如图 2 所示。利用此方法在 100 mm×100 mm×100 mm 的砂浆试件上制备单裂缝及不同间距的双裂缝。

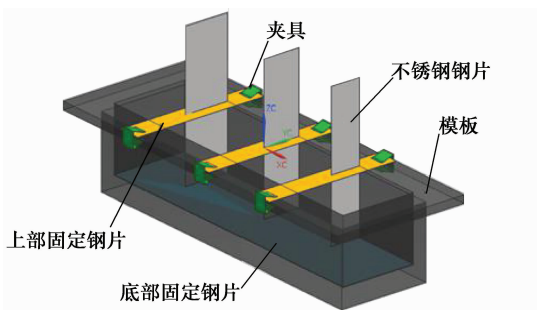


图 1 试验装置三维图

Fig. 1 Graphic model of experimental setup



图2 制备完成的双缝砂浆试件

Fig. 2 Concrete specimens with double cracks

1.3 试验过程

将带裂缝试件置于氢氧化钙溶液中浸泡7 d以达到饱和状态,然后放入浓度为5%的氯化钠溶液开始自然浸泡,除开裂面及其对面,其他4个侧面用石蜡密封,持续30 d,日平均气温20℃。浸泡结束后取出试件,洗去试件表面盐溶液并晾干,将试块垂直于裂缝方向劈开,在断裂面喷洒0.1 mol/L的硝酸银溶液,15 min后以黑色记号笔勾勒出显色分界线,并用钢尺测量出分界线与试块底面之间的距离,即氯离子扩散深度。试验中的测量点包括裂缝处及其左右5、10、15、20、25、30、35、40 mm处,并对顶部及拐角位置进行加密测量,精确至0.1 mm。

2 实验结果分析

2.1 单缝砂浆试件试验结果及分析

水灰比为0.4(裂缝宽度0.2 mm、深度40 mm)的单缝砂浆试件氯离子扩散深度如图3所示,根据试验数据绘制不同水灰比试件氯离子扩散深度如图4所示。



图3 单缝砂浆氯离子扩散深度

Fig. 3 Chloride ion diffusion depth in single slit specimens

从图4可以看出,单缝砂浆试件发生了沿裂缝开展方向及垂直于裂缝开展方向的扩散作用,随着水灰比的减小,砂浆试件的抗氯离子扩散性能明显提高。

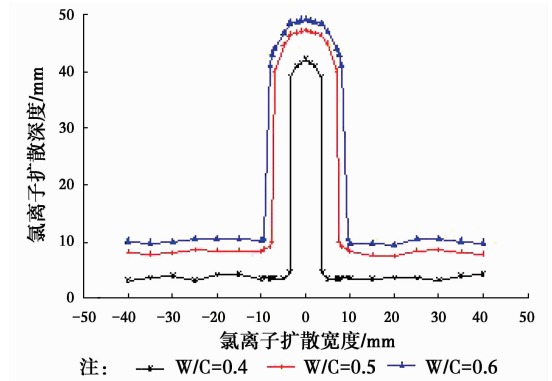
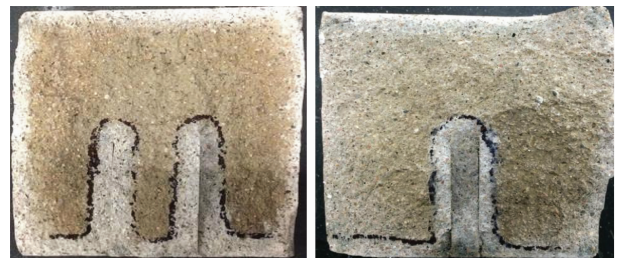


图4 不同水灰比试件氯离子扩散深度

Fig. 4 Chloride ion diffusion depth in specimens with different water cement ratio

2.2 双缝砂浆试件试验结果及分析

裂缝宽度0.2 mm、深度50 mm的双缝砂浆试件氯离子扩散情况如图5所示,根据试验数据绘制不同水灰比双缝试件的氯离子扩散深度,如图6所示。



(a) 水灰比为0.6, 裂缝间距30 mm

(b) 水灰比为0.5, 裂缝间距10 mm

图5 双缝砂浆试件氯离子扩散情况

Fig. 5 Chloride ion diffusion depth in double slits specimens

从图5中可以看出,当裂缝间距大于等于30 mm时,双缝间扩散的交互影响作用不明显,故试验重点分析不同水灰比情况下,裂缝间距分别为10 mm和20 mm时氯离子扩散的交互作用。由图6可知,当裂缝间距为10 mm时,0.4水灰比试件的氯离子扩散曲线类似于由两个单缝砂浆氯离子扩散曲线简单组合而成,在双缝间几乎未发生交互影响。0.5水灰比及0.6水灰比试件的双缝间产生了较为明显的扩散交互作用,顶部曲线类似于抛物线,与单缝砂浆相比,双缝砂浆扩散曲线的最高点由两条裂缝的正上方转移到了两条裂缝的中心位置,双缝氯离子扩散时的最高点位置比单缝最高点高出1.2 mm及1.1 mm。当裂缝间距为20 mm时,0.4和0.5水灰比试件的双缝扩散交互作用不明显,而0.6水灰比试件受到两缝氯离子扩散作用的交互影响程度小于间距为10 mm的试件。

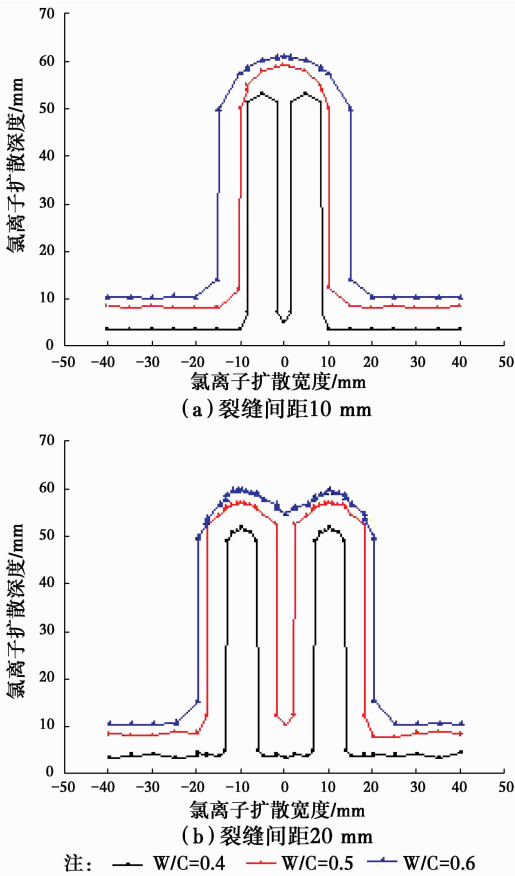


图 6 不同水灰比双缝砂浆试件氯离子扩散深度
Fig. 6 Chloride ion diffusion depth in specimens
with different water cement ratio

3 带裂缝混凝土氯离子扩散机理分析

3.1 氯离子扩散方程

氯离子在混凝土内的输运方式是基于氯离子浓度梯度引起的扩散作用,并满足 Fick 定律。其前提假设为:

- 1) 混凝土为一维扩散。
- 2) 基体的氯离子结合能力为 0。
- 3) 暴露表面的氯离子浓度及氯离子扩散系数为定值。

则根据 Fick 定律,其控制方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中: C 为氯离子浓度, kg/m^3 ; D 为氯离子扩散系数, m^2/s 。

相应的初始条件及边界条件为

$$x > 0 \text{ 且 } t = 0, C = C_0$$

$$x = 0 \text{ 且 } t > 0, C = C_s$$

式中: C_0 为混凝土内的初始氯离子浓度, kg/m^3 ; C_s

为混凝土暴露面的氯离子浓度, kg/m^3 。

求解方程(1),可得出预测混凝土中氯离子浓度的计算式

$$C = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2)$$

式中: $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为误差函数, $\operatorname{erf}(u) = \int_0^u e^{-t^2} dt$ 。

3.2 扩散系数的修正

实际情况中,混凝土氯离子扩散系数会受到氯离子结合能力、环境温度条件、时间等因素影响,综合考虑各方面因素,氯离子扩散系数 D 可表示为

$$D = F_c(ccl) \cdot F_t(tcl) \cdot F_T(Tcl) \cdot D_0 \quad (3)$$

式中: $F_c(ccl)$ 为氯离子结合能力调整系数; $F_t(tcl)$ 为时间调整系数; $F_T(Tcl)$ 为温度调整系数; D_0 为参考状态情况下的氯离子扩散系数。

3.2.1 氯离子吸附作用影响因素 混凝土中的总氯离子浓度由结合氯离子浓度与自由氯离子浓度构成,只有自由氯离子会导致钢筋脱钝锈蚀,其中三者的关系为^[15]

$$C = \omega C_f + C_b \quad (4)$$

式中: C 为总氯离子浓度; C_f 为自由氯离子浓度; C_b 为结合氯离子浓度; ω 为胶凝材料含水率。

氯离子结合能力调整系数 $F_c(ccl)$ 可以表示为

$$F_c(ccl) = \frac{D_a}{D_e} \quad (5)$$

式中: D_a 为考虑吸附作用下的氯离子扩散系数; D_e 为不考虑吸附作用下的氯离子扩散系数。

学者们给出的氯离子结合模型,可以概括为线性结合模型、Freundlich 结合模型及 Langmuir 结合模型 3 种形式。笔者选用 Langmuir 模型进行数值计算

$$C_b = \frac{\alpha C_f}{1 + \beta C_f}, \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \frac{\alpha}{(1 + \beta C_f)^2},$$

$$D_a = \frac{D_e}{1 + \frac{\alpha}{\omega(1 + \beta C_f)^2}} \quad (6)$$

式中: α 和 β 为 Langmuir 常数, Ishida 等^[16]发现在普通混凝土中, $\alpha = 11.8$, $\beta = 4.0$; 对于粉煤灰混凝土, $\alpha = -15.5\gamma^2 + 1.8\gamma + 11.8$ ($0 \leq \gamma \leq 0.4$), γ 为粉煤灰取代水泥量。

3.2.2 时间影响因素 根据 Kowon 等^[17]的研究结论可知,时间对氯离子扩散系数的影响因素 $F_t(tcl)$ 可以表示为

$$F_t(tcl) = \begin{cases} \frac{1}{1 - \beta} \left(\frac{30}{t} \right)^\beta & t < 30 \text{ a} \\ \left[1 + \frac{30}{t} \left(\frac{\beta}{1 - \beta} \right) \right] \left(\frac{30}{t} \right)^\beta & t \geq 30 \text{ a} \end{cases} \quad (7)$$

式中: β 为依赖于混凝土自身性质的常数,对于普通混凝土, β 可取为 0.46。

3.2.3 温度影响因素 Stephen 等^[18] 通过试验研究,得出了氯离子扩散系数随温度变化的规律,建立了考虑温度影响的扩散系数公式

$$FT(Tcl) = \exp\left(q\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (8)$$

式中: q 为常数,当水灰比为 0.4 时, $q = 6\ 000$; 水灰比为 0.5 时, $q = 5\ 450$; 水灰比为 0.6 时, $q = 3\ 850$,当水灰比为中间值时采用线性内插法得出 q 值。 T_1 为参考温度,取为 296 K; T 为实际温度。

3.3 数值模型的建立

采用硝酸银显色法测定氯离子扩散深度,虽然操作简单,但是使硝酸银显色的氯离子浓度存在下限值,这意味着当氯离子浓度小于此限值时的浓度分布便无法得知,更无法对氯离子的具体浓度值及其浓度梯度分布进行研究,而通过有限元数值计算能够得到任意时间点、不同位置处的氯离子浓度,继而可以开展更深层次的分析及理论验证。

采用有限元法对带裂缝混凝土中的氯离子扩散过程进行计算,根据氯离子扩散控制方程与 ANSYS 中温度场控制方程的相似性,将氯离子浓度 C 替换为温度 T ,氯离子扩散系数 D 替换为导热系数 K ,并将温度场绝热温升项设置为 0(代表混凝土内部自身不产热),密度与质量热容参数均设置为 1,即可用 ANSYS 温度场分析模块对氯离子扩散问题进行数值计算。模型采用文献^[19]的计算方法,得到表面氯离子浓度为 $860\ \text{mol/m}^3$ 。

模型采用 PLANE55 二维单元进行计算,混凝土内初始氯离子浓度为 0,孔隙饱和,环境温度 $20\ ^\circ\text{C}$ 。以裂缝宽度 0.2 mm、裂缝深度 10 mm 的混凝土试件为例,用式(3)计算出的氯离子扩散系数 $D = 12.2 \times 10^{-12}\ \text{m}^2/\text{s}$,划分网格后的模型如图 7 所示,时间步长为 24 h,浸泡时间为 30 h。

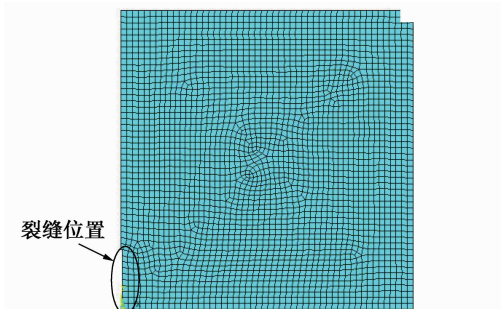


图 7 带裂缝混凝土氯离子扩散模型

Fig. 7 Chloride ion diffusion model in concrete with cracks

3.4 数值计算结果及参数分析

图 8 所示为裂缝宽度 0.2 mm、裂缝深度 10 mm 的混凝土试件模型的氯离子扩散浓度云图(以 6 d 和 18 d 为例)。

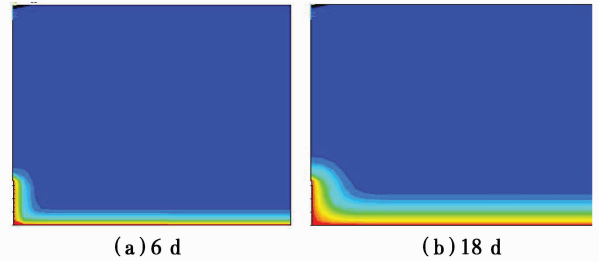


图 8 氯离子浓度云图

Fig. 8 Cloud picture of chloride ion concentration

3.4.1 数值计算结果与试验结果对比 为了与有限元数值计算所得浓度值进行对比,进行相应的 30 d 氯盐溶液浸泡试验,试验中以钻孔取粉方法^[20]测定裂缝深度为 10 mm、裂缝宽度分别为 0.1、0.2、0.3 及 0.5 mm 混凝土试件的氯离子浓度。此方法可以测得试块断面裂缝区域周围不同位置处的氯离子浓度,与硝酸银的显色区域相对比,得到显色区域边界处氯离子浓度约为 $79\ \text{mol/m}^3$,故可由氯离子浓度分布云图读出相应的氯离子扩散深度。

图 9 为不同裂缝宽度下的氯离子扩散深度理论值与试验值,从图中可以看出,试验结果与数值模拟结果具有良好的一致性。当扩散宽度在 10 mm 范围内时,氯离子扩散深度随着扩散宽度的增加而显著减小;当扩散宽度超过 10 mm 后,氯离子扩散深度基本保持在一条水平线上。对比图 9(a)~(d) 可知,试验和模拟所得的氯离子扩散深度均随裂缝宽度的增加而增长,在 0~18 d 时,氯离子扩散深度的增加相对显著,18 d 之后变化不明显,裂缝宽度对于扩散深度的增加起到了更为显著的影响作用。

3.4.2 裂缝宽度对氯离子扩散深度的影响 不同裂缝宽度下氯离子扩散深度随时间的变化规律如图 10 所示。18 d 后氯离子扩散深度的变化不明显,因此,图中给出了前 24 d 的数据进行分析。从图中可知,氯离子在带裂缝混凝土中的扩散深度随着时间的增长而增大,但速率逐渐减缓,18 d 后趋于平稳,相同时间时氯离子扩散深度随着裂缝宽度的增加而增大。在扩散宽度为 15 mm 处,扩散深度随裂缝宽度的变化规律如图 11 所示,可以看出,当裂缝宽度小于 0.1 mm 时,扩散深度随着裂缝宽度的增加呈现显著的线性增长趋势;而当裂缝宽度超过 0.1 mm 时,氯离子扩散深度增长速率降低。

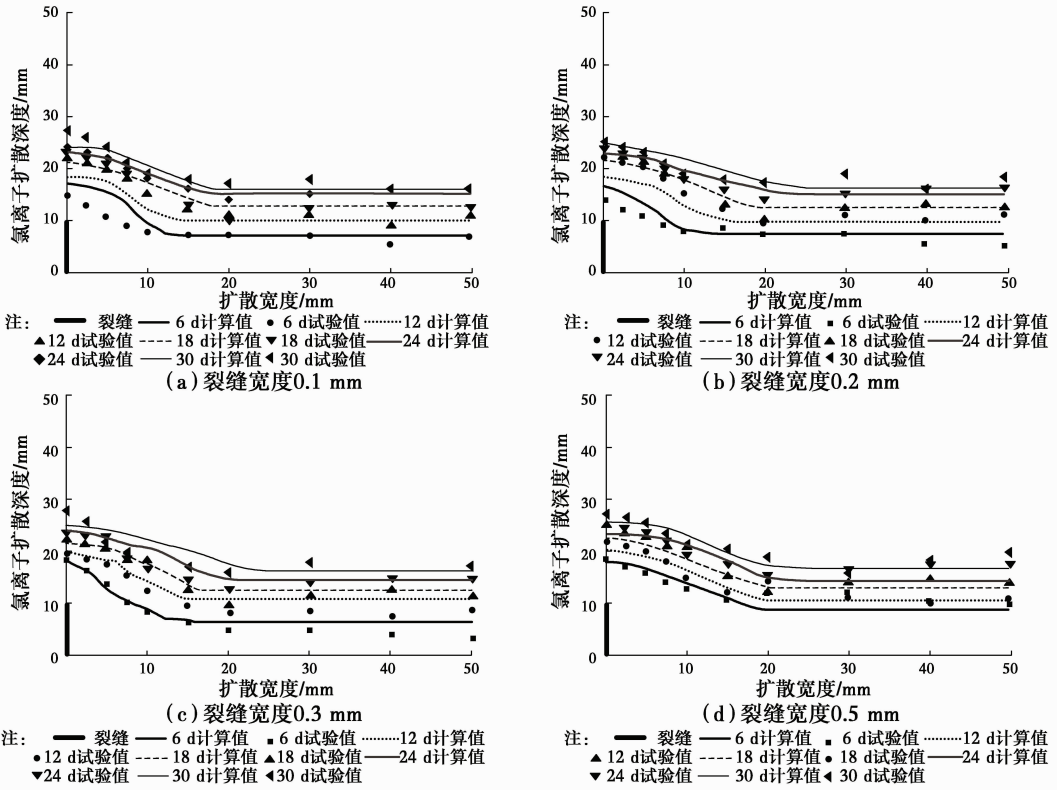


图 9 不同裂缝宽度下的氯离子扩散深度理论值与试验值

Fig. 9 Chloride ion diffusion depth in specimens with different slits width

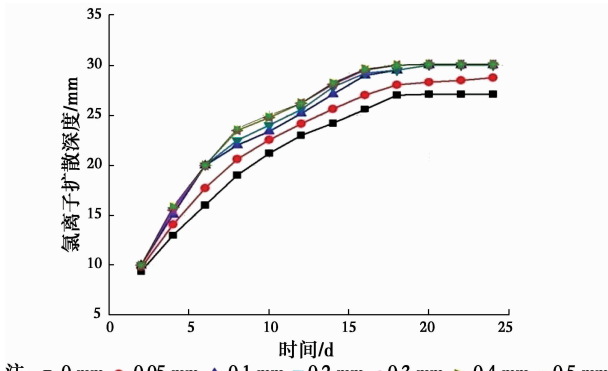


图 10 不同裂缝宽度下扩散深度随时间的变化
Fig. 10 Chloride ion diffusion depth variation in specimens with different slits width

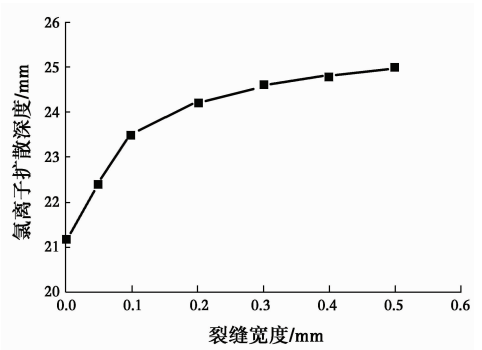


图 11 扩散深度与裂缝宽度关系
Fig. 11 The relationship between chloride ion diffusion depth and slits width

3.4.3 时间因素对氯离子浓度分布的影响 在模型内部任取一点($x=15\text{ mm}$, $y=25\text{ mm}$),分析时间对氯离子浓度分布的影响,同样给出前 24 d 数据,浓度分布曲线如图 12 所示。从图中可以看出,氯离子浓度随时间的变化规律基本一致,而且裂缝的存在对于氯离子在混凝土中的扩散过程起到了促进作用。24 d 时不同裂缝宽度下的氯离子浓度增长率整理见表 2,从表中可以看出氯离子浓度随着裂缝宽度的增加首先减小然后趋于稳定,且在裂缝宽度小于 0.1 mm 时,氯离子浓度的增长速度明显比裂缝宽度大于 0.1 mm 时要快。

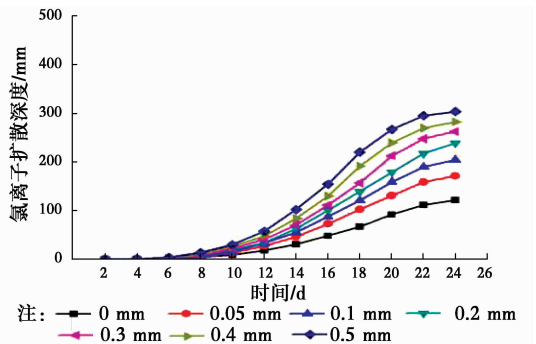


图 12 带裂缝混凝土中氯离子随浓度分布曲线
Fig. 12 The distribution curve of chloride ion diffusion in concrete with cracks

表 2 氯离子浓度随裂缝宽度变化的增长率

Table 2 The growth rate of chloride ion concentration on the crack width

裂缝宽度/mm	浓度增长率/%	裂缝宽度/mm	浓度增长率/%
0~0.05	54.1	0.2~0.3	33.4
0.05~0.1	43.3	0.3~0.4	34.1
0.1~0.2	38.2	0.4~0.5	32.5

3.4.4 裂缝深度对氯离子浓度分布的影响 对于不同裂缝深度,氯离子浓度随裂缝开展方向(即 y 方向)的分布情况如图 13 所示。从图中可以看出,带裂缝混凝土中的氯离子浓度明显大于完整混凝土中的氯离子浓度。当裂缝宽度相同时,裂缝深度越大,氯离子浓度下降速率越快。当氯离子浓度等于 79 mol/m^3 时,对应的横坐标值即为这一点的扩散深度。

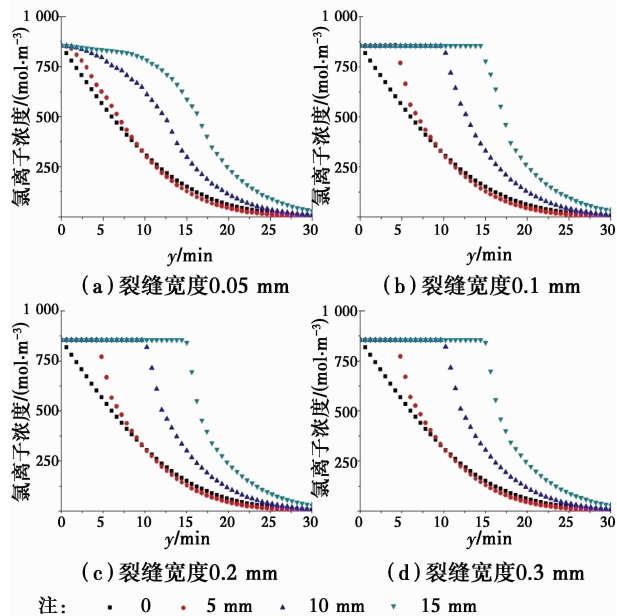


图 13 沿裂缝开展方向的氯离子浓度分布

Fig. 13 The distribution curve of chloride ion diffusion along the direction of cracks propagation

氯离子浓度随垂直于裂缝开展方向(即 x 方向)的分布情况如图 14 所示。从图中可以看出,裂缝深度为 15 mm 的开裂模型中氯离子浓度明显大于其他裂缝深度,说明当裂缝深度到达某一限值会对氯离子扩散产生显著影响,当裂缝宽度为 0.3 mm 时,缝深为 10 mm 的开裂模型中的氯离子浓度分布相较于裂缝宽度为 0.2 mm 时有了显著增加。

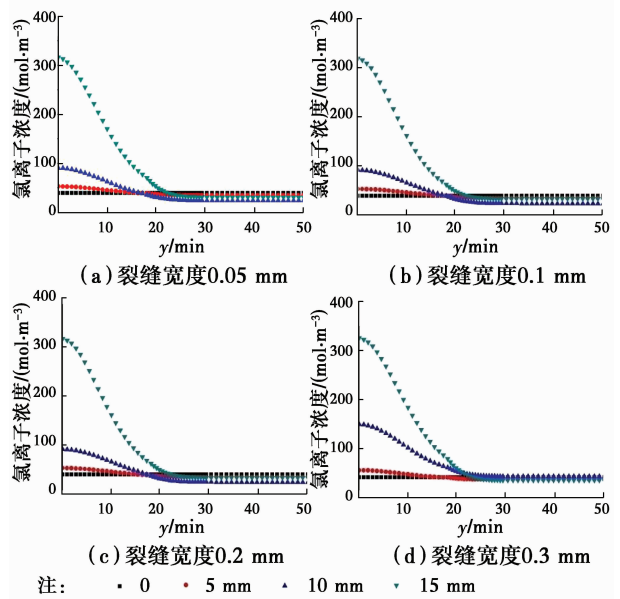


图 14 垂直于裂缝开展方向的氯离子浓度分布

Fig. 14 The distribution curve of chloride ion diffusion perpendicular to the direction of cracks propagation

4 结论

以氯离子在带裂缝混凝土中的扩散过程研究为主线,提出了无损制备裂缝方法,同时进行了氯盐溶液浸泡试验研究,并应用 ANSYS 软件对氯离子扩散过程进行了模拟,得出如下结论:

1) 利用提出的无损制备裂缝新方法成功实现了制备宽度及深度可控的带裂缝混凝土试件,满足了不同种类试验裂缝制备方案的要求,便于开展单裂缝及多裂缝存在条件下的混凝土耐久性试验研究。

2) 带裂缝砂浆试件中的氯离子会发生沿裂缝发展方向及垂直于裂缝发展方向的扩散作用,随着水灰比的减小,砂浆试件的抗氯离子扩散性能明显提高,当裂缝间距为 20 mm 时,双缝间的氯离子扩散交互影响作用明显小于裂缝间距为 10 mm 时。

3) 综合考虑了氯离子结合能力、环境温度条件及侵蚀时间等影响因素,修正了氯离子在混凝土中的扩散系数。应用 ANSYS 软件对带裂缝混凝土中的氯离子扩散过程进行了模拟,氯离子扩散深度在 0~18 d 增长相对明显,相较于时间因素,裂缝宽度对于扩散深度的增加起到了更为显著的影响作用。当裂缝宽度小于 0.1 mm 时,扩散深度随着裂缝宽度的增加呈现线性增长趋势;而当裂缝宽度超过 0.1 mm 时,氯离子扩散深度增长速率减缓。

参考文献:

- [1] GOWRIPALANAN P, SIRIVIVATNANON V, LIM C C. Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(5): 725-730.
- [2] WIN P P, WATANABE M, MACHIDA A. Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(7): 1073-1079.
- [3] 张邵峰, 陆春华, 陈好, 等. 裂缝对混凝土内氯离子扩散和钢筋锈蚀的影响[J]. *工程力学*, 2012, 29: 97-100.
ZHANG S F, LU C H, CHEN H, et al. Influence of cracks on chloride diffusion and reinforcement corrosion in concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29: 97-100. (in Chinese)
- [4] LINDQUISTI W D, DARWIN D, BROWNING J, et al. Effect of cracking on chloride content in concrete bridge decks [J]. *ACI Materials Journal*, 2006, 103: 467-473.
- [5] 张士萍, 刘加平, 董良峰. 收缩裂缝对混凝土氯离子传输的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2011, 33(6): 90-92.
ZHANG S P, LIU J P, DONG L F. Influence of shrinkage cracking on chloride ions transport of concrete [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(6): 90-92. (in Chinese)
- [6] 张君, 居贤春, 公成旭. 混凝土中的裂缝对氯盐侵蚀作用的影响[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2010, 31(6): 720-724.
ZHANG J, JU X C, GONG C X. Effect of cracks in concrete on chloride penetration [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2010, 31(6): 720-724. (in Chinese)
- [7] 延永东. 氯离子在损伤及开裂混凝土内的运输机理及作用效应[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
YAN Y D. Transportation of chloride ions in damaged and cracked concrete and its action [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- [8] ISMAIL M, TOUMI A, FRANCOIS R, et al. Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in cracked mortar samples [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(8): 1106-1111.
- [9] TAKEWAKA K, YAMAGUCHI T, MAEDA S. Simulation model of deterioration of concrete structure due to chloride attack [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(2): 139-146.
- [10] KATO Y, UOMOTO T. Modeling of effective diffusion coefficient of substances in concrete considering spatial properties of composite materials [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2005, 3(2): 241-251.
- [11] 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.
- [12] 庄其昌. 裂缝对海工混凝土耐久性影响研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
ZHUANG Q C. Influence of crack on durability of marine concrete [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2010. (in Chinese)
- [13] DJERBI A, BONNET S, KHELIDJ A, et al. Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete [J]. *Cement & Concrete Research*, 2008, 38(6): 877-883.
- [14] 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): 2128-2133.
YAN Y D, JIN W L, WANG H L. Chloride ingress in cracked concrete under saturated state [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2011, 45(12): 2128-2133. (in Chinese)
- [15] 付传清. 混凝土中氯盐的传输机理及钢筋锈胀模型[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
FU C Q. Transport mechanism of chloride in concrete and corroded RC expansion model [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] AMEY S L, JOHNSON D A, MILTENBERGER M A, et al. Predicting the service life of concrete marine structures: an environmental methodology [J]. *ACI Structural Journal*, 1998, 95(2): 205-214.
- [19] ACHARI G, CHATTERJI S, JOSHI R C. Chloride transport due to wick action in concrete [C]// RILEM International Workshop on Chloride Penetration into Concrete, 1995: 74-76.
- [20] 中华人民共和国交通部. 水运工程混凝土试验规程: JTJ 270—1998 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Testing code of concrete for port and waterway engineering: JTJ 270-1998 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998. (in Chinese)