

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.100



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



开裂混凝土中氯离子等效扩散系数计算方法

张志明¹, 彭建新¹, 程小康¹, 龙煜²

(1. 长沙理工大学土木工程学院, 长沙 410114; 2. 湖南天筑六建混凝土有限公司, 长沙 410119)

摘要: 氯离子侵蚀对钢筋混凝土结构有严重的劣化作用, 混凝土中的裂缝为氯离子的快速扩散提供了通道, 进而加快了结构力学性能的失效速度。现有研究多集中于单一裂缝特征因素对氯离子扩散系数的影响, 根据试验结果给出的拟合公式具有局限性。结合机器视觉技术提取和量化多个裂缝特征因素, 构建考虑裂缝密度、裂缝内界面粗糙度和裂缝取向度叠加影响的代表性单元体积(REV)模型, 并计算其等效扩散系数, 将已有研究的试验结果与基于REV模型的计算结果进行对比。结果表明: 不同盐冻条件下的平均相对误差为1.6%, 完成28次盐冻后不同初始裂缝条件下的平均相对误差为2.9%, 计算结果与试验结果较为吻合, 表明提出的开裂混凝土中氯离子等效扩散系数具有较好的可靠性。

关键词: 氯离子; 混凝土; 裂缝; 等效扩散系数; 机器视觉

中图分类号: U444; TU503 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)05-0184-07

Calculation method of chloride ion equivalent diffusion coefficient in cracked concrete

ZHANG Zhiming¹, PENG Jianxin¹, CHENG Xiaokang¹, LONG Yu²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P. R. China;
2. Hunan Tianzhu No.6 Construction Concrete Co., Ltd., Changsha 410119, P. R. China)

Abstract: There is a serious degradation effect on reinforced concrete by chloride ions. Cracks provide a fast channel for diffusion and accelerate the failure of structural durability. In the available publications, scholars focus on studying the influence of a single fracture characteristic factor on the chloride diffusion coefficient, the fitting formula based on the experimental results has limitations. Therefore, in this study, machine vision technology was used to extract and quantify multiple fracture characteristic factors. The representative elementary volume (REV) model of cracked concrete was constructed, and its equivalent diffusion coefficient was calculated by combining the influence of cracking density, interfacial roughness and orientation degree of

收稿日期: 2022-04-22

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600900); 国家自然科学基金(52078056); 湖南省研究生科研创新重点项目(CX20220853); 长沙理工大学研究生“实践创新与创业能力提升计划”(CLSJCX22029)

作者简介: 张志明(1998-), 男, 主要从事结构耐久性研究, E-mail: zzm_csust@163.com。

彭建新(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: jianxinpeng@csust.edu.cn。

Received: 2022-04-22

Foundation items: The National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2600900); National Natural Science Foundation of China (No. 52078056); The Key Project of Postgraduate Research and Innovation in Hunan Province (No. CX20220853); Project of Changsha University of Science & Technology Postgraduate “Practical Innovation and Entrepreneurial Ability Improvement Plan” (No. CLSJCX22029)

Author brief: ZHANG Zhiming (1998-), main research interest: durability of concrete structures, E-mail: zzm_csust@163.com.

PENG Jianxin (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: jianxinpeng@csust.edu.cn.

cracks. Finally, the experimental results in the literature are compared with the calculated results based on the REV model. The conclusions show that the average relative error is 1.6% under different conditions of salt freeze, and 2.9% under different initial fracture conditions after 28 times of salt freeze. The results agree well. This indicates that the proposed chloride ion equivalent diffusion coefficient for cracked concrete has good reliability.

Keywords: chloride ion; concrete; crack; equivalent diffusion coefficient; machine vision

对于沿海混凝土结构,开裂混凝土内氯离子的侵蚀程度是研究结构耐久性及其寿命的重要评价标准。结构在长期服役中由于荷载、收缩以及盐冻等的作用产生裂缝,氯离子通过裂缝进入混凝土内加速钢筋的锈蚀损伤。开裂混凝土中的氯离子的扩散行为一直是工程结构全寿命周期设计研究的重点。

开裂混凝土中氯离子的扩散行为常与裂缝形态有关。一方面,裂缝宽度对氯离子的扩散影响最为显著,Du等^[1]通过试验发现在海洋环境下有害氯离子侵蚀的临界裂缝宽度为0.3 mm,在电化学加速腐蚀下临界裂缝宽度为0.2 mm。张菊辉等^[2]对开裂混凝土进行氯离子自然浸泡实验,发现氯离子迁移系数与裂缝宽度和裂缝深度呈指数关系。另一方面,氯离子的扩散随裂缝弯曲程度和开裂深度的变化呈现出一定的规律,Jim等^[3]通过数值方法发现氯离子在弯曲裂缝和矩形裂缝中扩散速率更快。Wang等^[4]认为裂缝深度对氯离子扩散速率的影响较裂缝形状更明显,研究表明,长期浸泡下,同一深度处氯离子扩散行为在不同形状裂缝下相似。针对氯离子扩散系数的研究多集中于裂缝宽度或者裂缝深度等单一因素,Yoon等^[5]发现裂缝宽度对扩散系数的影响与时间相关。考虑其他环境因素的影响,AL-Ameeri等^[6]发现碳化程度会随裂缝深度的增加而增加,而碳化又会进一步促进氯离子的扩散。当前对多个裂缝因素的叠加影响研究较少,Gérard等^[7]基于裂缝密度和裂缝宽度,采用各向同性和各向异性的裂缝网格对混凝土的扩散系数进行了简单预测。Park等^[8]进一步细化研究内容,考虑微观裂缝中氯离子扩散和水分的传输,分析了非饱和状态下REV模型中扩散系数和裂缝宽度之间的关系。Yang等^[9]在此基础上,构建了REV模型,引入楔形裂缝和裂缝内界面粗糙度,提高了扩散系数的预测精度。总体而言,全面考虑裂缝特征的各个因素,有利于准确预测氯离子在开裂混凝土中的扩散系数。

目前机器视觉技术在裂缝的识别与量化中广泛应用。徐阳^[10]基于计算机视觉技术对桥梁结构的裂缝进行识别和定位。王一兵等^[11]提出

LabVIEW+VDM的混凝土坝裂缝检测系统开发方法,提取了裂缝骨架并计算了裂缝宽度、长度和面积。王睿等^[12]等应用RBF-SVM技术进行裂缝的自动识别,提高了机器视觉对裂缝特征分配应用的可行性。利用机器视觉技术高效提取裂缝形态相关的参数可以准确地研究开裂混凝土中氯离子扩散行为。

笔者利用机器视觉技术量化裂缝密度和裂缝的取向度,并考虑裂缝内界面粗糙度的影响,基于菲克定律和质量守恒定律建立了开裂混凝土中氯离子扩散系数的计算模型。最后,对已有文献中的试验结果进行应用分析,预测其氯离子等效扩散系数。

1 机器视觉识别与裂缝参数提取

1.1 裂缝图像数字化处理

利用机器视觉技术识别裂缝一直是结构健康监测领域中的研究热点。裂缝图像数字化处理的流程如图1(a)所示。在Mendeley Dataset公开数据集中选择裂缝图像进行演示,每张图片尺寸为 227×227 ,采用RGB三通道显示^[13]。原始图像和部分数字化处理的裂缝图像如图1(b)~(f)所示。

1.2 裂缝参数提取

图像处理量化的参数包括裂缝的密度和裂缝的取向度。在进行裂缝密度计算时,令二值化图像中白色区域为裂缝面积 S_w ,整个图像区域面积为 S_a ,裂缝密度 ρ 由式(1)求得。

$$\rho = \frac{S_w}{S_a} \quad (1)$$

干湿循环或冻融条件下产生的裂缝走向通常是弯曲无规则的,Wang等^[14]利用经典体视学的方法对裂纹方向进行了量化。裂缝取向度的计算具体步骤如下:

1)在裂缝二值化图像中插入一组平行线,如图1(g)所示;

2)平行线按照一定间隔的角度进行旋转,旋转角度范围为 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$;

3)记录每次旋转后平行线与裂缝的交点数 N_L ,取最大值 $N_{L,max}$ 和最小值 $N_{L,min}$,将其代入式(2)得到

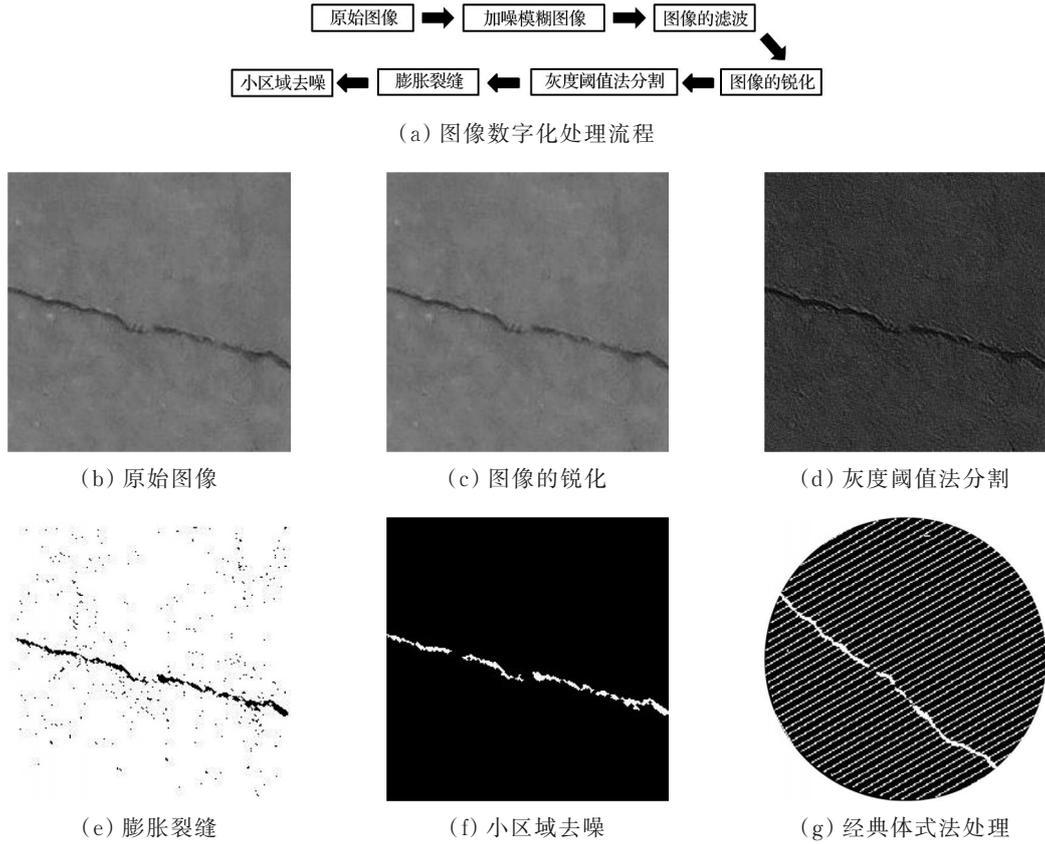


图 1 机器视觉识别与裂缝参数提取

Fig. 1 Machine vision recognition and fracture information extraction

取向度 ω 。

$$\omega = \frac{N_{L,max} - N_{L,min}}{N_{L,max} + \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) N_{L,min}}, 0 \leq \omega \leq 1 \quad (2)$$

2 开裂混凝土中等效扩散系数求解

2.1 氯离子在开裂混凝土中的传输行为

氯离子在开裂混凝土中遵循质量守恒定律,通过微观单元的总分子量由完整区域的分子量和裂缝区域的分子量组成。单位时间内,氯离子在单元内任意截面处的扩散通量满足方程

$$(A_0 + A_1)J_{tot} = A_0J_0 + A_1J_1 \quad (3)$$

式中: A_0 为完好区域的面积; A_1 为开裂区域的面积; J_0 为完好区域的氯离子扩散通量; J_1 为裂缝区域的氯离子扩散通量。

在此基础上构建 REV 模型,设置单元形状为棱柱体,棱柱体的顶面代表裂缝区域的采样区间,棱柱体高度 L_2 为采样裂缝深度。单元体模型设置如图 2 所示。

2.2 氯离子等效扩散系数的求解

在混凝土材料中,离子间的相互作用非常明显,离子浓度越高,结构中的物理化学反应越复杂。这些相互作用对离子的扩散和迁移产生一定程度

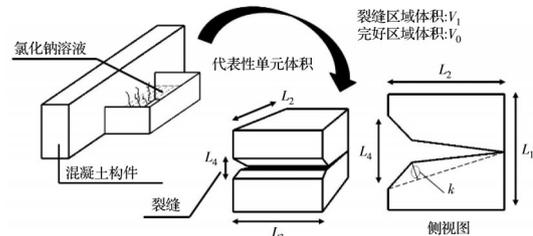


图 2 开裂混凝土中 REV 模型

Fig. 2 REV model in cracked concrete

的影响。为简化分析模型,求解氯离子在开裂混凝土中的扩散系数需满足如下假设^[7]:

- 1) 自由移动的氯离子不会与骨料中的物质发生物理或化学反应;
- 2) 氯离子的扩散是在恒温条件下进行的;
- 3) 忽略电泳和弛豫效应。

在 REV 模型中氯离子扩散满足菲克定律,单位时间内通过垂直于扩散方向的扩散通量与该截面处的浓度梯度成正比, J_0 和 J_1 满足方程

$$J_0 = -D_0 \frac{\partial C}{\partial x} \quad J_1 = -D_1 \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4)$$

式中: D_0 为未开裂混凝土扩散系数; D_1 为自由溶液的扩散系数。综合式(3)、式(4),可以获得等效扩散系数的求解方程

$$D = (D_0A_0 + D_1A_1) / (A_0 + A_1) \quad (5)$$

考虑 REV 中单位裂缝深度,式(5)可以近似改写成式(6)。

$$D = (D_0V_0 + D_1V_1)/(V_0 + V_1) \quad (6)$$

式中: V_1 为裂缝空腔的体积; V_0 为完好混凝土体积。引入体积比 $S = V_0/V_1$,得到等效扩散系数与未开裂混凝土扩散系数之比^[7]

$$\frac{D}{D_0} = \left(\frac{D_1}{D_0} + S \right) / (1 + S) \quad (7)$$

考虑裂缝宽度的影响,引入宽度影响系数 $f(f = L_1/L_4)$, f 远大于 1。考虑粗糙度对扩散行为的影响,引入粗糙度影响系数 $p(p = k/L_4)$,其中 k 为开裂后新界面粗糙位置的最高点到楔形开裂面的垂直距离,如图 2 所示。Yang 等^[9]通过试验得出人工诱导裂缝下内界面的粗糙度影响系数的合理取值为 0.1~0.3。综合上述研究,REV 模型内完好混凝土体积与裂缝空腔体积之比按式(8)进行求解。

$$S = \frac{2(L_1 - L_4)L_2L_3}{L_2L_3L_4 - L_2kL_3} \approx \frac{2f}{1 - 2p} \quad (8)$$

由于裂缝区域的采样区间为正方形,裂缝密度 ρ 可以由式(9)转换为宽度影响系数 f 。

$$\rho = \frac{S_w}{S_a} = \frac{A_1}{A_1 + A_0} = \frac{L_4}{L_1} = \frac{1}{f} \quad (9)$$

综合考虑式(7)~式(9),可以得到 REV 模型中等效扩散系数

$$D = D_0 \left[\frac{D_1(1 - 2p)\rho}{2D_0} + 1 \right] \quad (10)$$

2.3 模型参数影响分析

2.3.1 裂缝宽度

文献[15]研究了不同裂缝宽度对氯离子扩散系数的影响。选用不同的插片预制裂缝,可以认为裂缝内界面较光滑,粗糙度影响系数为 0。试验中采用电场加速氯离子迁移方法测量其扩散系数。试验测量值和模型计算值如图 3 所示。

两组数据均随裂缝宽度的增加而增加。裂缝宽度较小时,试验测量值大于模型计算值,这是因为开裂混凝土中氯离子的传输方式包括扩散和裂

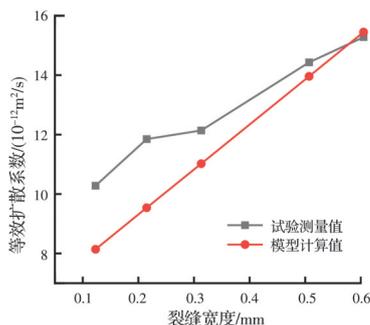


图 3 不同裂缝宽度下的扩散系数

Fig. 3 Diffusion coefficient at different crack widths

缝孔隙中的对流,而 REV 模型仅考虑了扩散。随着裂缝宽度增加,两者间的差越来越小。当裂缝宽度为 605 μm 时,文献[15]的试验测量值为 $15.28 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,式(10)的模型计算值为 $15.45 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2.3.2 水胶比

文献[16]研究了不同水胶比对开裂混凝土中氯离子扩散系数的影响。选用不锈钢片预制宽度为 0.2 mm 的裂缝,同样可以认为裂缝内界面光滑,粗糙度影响系数为 0。试验通过氯离子快速迁移法(RCM)测得氯离子扩散系数。文献[16]的试验测量值和式(10)的模型计算值如图 4 所示。

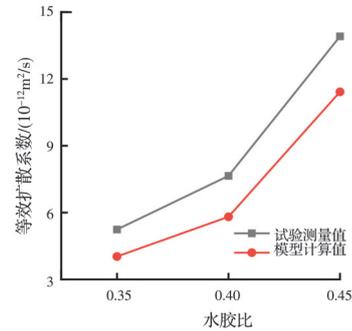


图 4 不同水胶比下的扩散系数

Fig. 4 Diffusion coefficient under different water-binder ratio

可以看出,试验测量值与模型计算值均随水胶比的增大而增大。这是因为水胶比越大,混凝土中开裂处的孔隙率也就越大,为氯离子扩散提供了更便捷的通道。从氯离子扩散系数的变化率上看,模型计算值与试验测量值基本一致。

3 试验验证

3.1 基于机器视觉的等效扩散系数计算

在拍照测量的过程中,由于拍照设备的精度以及拍摄环境的限制,数字图像的处理还存在一定的系统误差。为简化计算工作,提高 REV 模型的准确性,选择的裂缝区域应该尽可能地突出显示裂缝特征。在裂缝的二值图像中,预先假设一个裂缝取向度阈值和完整度阈值,低于这个值的裂缝视为弯曲裂缝,认为不适合 REV 模型计算,需要对其进行裁剪。满足裂缝平直的要求后,再判断裁剪后的裂缝是否满足完整度要求,最后开始计算等效扩散系数。裂缝完整度计算公式如式(11)。

$$\text{Int} = \frac{S_w}{S_{w0}} \quad (11)$$

式中:Int 为裁剪后的裂缝完整度; S_{w0} 为裁剪前的裂缝面积。

系统默认的裁剪顺序为从左至右、从上至下。

在某一取向度和完整度阈值条件下,不同的裂缝形态完成裁剪后的效果也不一样,部分图像甚至出现丢失裂缝区域的情况。为避免这种情况的出现,需要动态调整裂缝的取向度和完整度阈值。具体实现流程如图 5 所示。

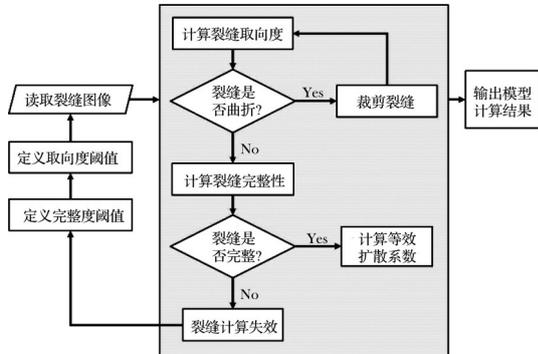


图 5 结合机器视觉计算等效扩散系数流程

Fig. 5 The flow of equivalent diffusion coefficient was calculated with machine vision

3.2 试验概况

为研究盐冻与初始裂缝耦合作用下混凝土的损伤发展规律,以及损伤后混凝土中氯离子的传输行为,刘光严^[17]开展了一系列的试验研究。试验选用巴西劈裂法产生了不同的初始裂缝并对其进行盐冻处理。最后,采用碘离子快速迁移法(RIM)研究了氯离子在损伤混凝土中的传输规律。选择试验中的两组数据进行分析,混凝土配合比见表 1,第 1 组初始裂缝宽度为 78 μm,分别进行 8、16、28 次冻融。第 2 组冻融次数为 28 次,初始裂缝宽度分别为 60、80、100、150 μm。两组试件的裂缝图像如图 6 和图 7 所示。由于骨料颜色与裂缝区域相似,计算机难以识别裂缝区域。为提高模型验证的准确率,将肉眼可见的骨料颜色进行淡化,裂缝骨架区域进行加深。

表 1 混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of concrete

W/C	减水剂/(kg/m ³)	水泥/(kg/m ³)	矿粉/(kg/m ³)
0.35	2.68	240.00	168.00
粉煤灰/(kg/m ³)	水/(kg/m ³)	砂/(kg/m ³)	集料/(kg/m ³)
72.00	168.00	735.00	1 625.00

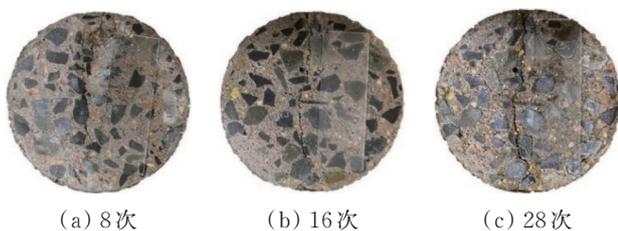


图 6 不同盐冻循环条件下的试件图像

Fig. 6 Specimen images under different salt-freeze cycles

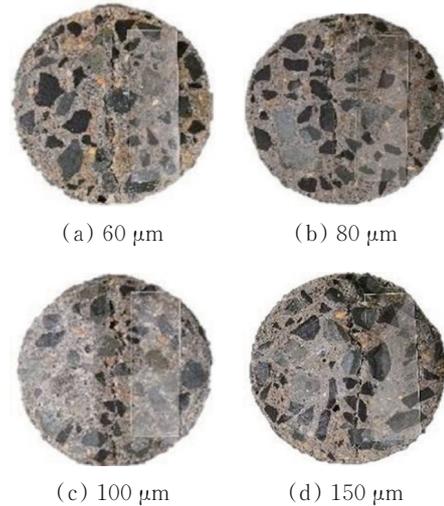
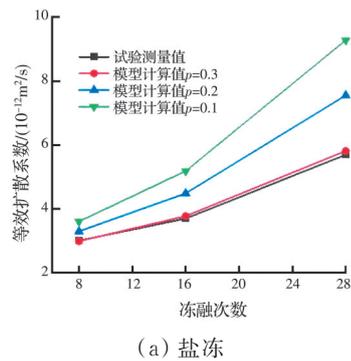


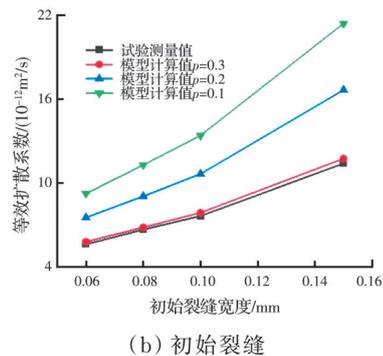
图 7 完成 28 次盐冻后不同初始裂缝条件下的试件图像
Fig. 7 The specimen images under different initial crack conditions after 28 times of salt freezing

3.3 试验结果验证

测得的未开裂混凝土扩散系数^[17]为 $2.36 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,自由溶液中氯离子扩散系数^[7]为 $1.00 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,裂缝内界面的粗糙度影响系数分别取 0.1、0.2 和 0.3,定义初始裂缝取向度阈值为 0.5,初始裂缝完整度阈值为 0.7。读取试件图像并计算得到 REV 模型下的等效扩散系数 D ,试验采用碘离子快速迁移法(RIM)测得氯离子扩散系数 D_i ,结果见图 8。试验模拟结果 D 和实验结果 D_i 的相对误差定义为 R 。



(a) 盐冻



(b) 初始裂缝

图 8 扩散系数试验与模型计算结果

Fig. 8 Experimental results and model calculation results

$$R_e = \frac{|D - D_i| \times 100}{D_i} \quad (12)$$

图8(a)为不同盐冻条件下扩散系数的变化情况,图8(b)为完成28次盐冻后不同初始裂缝条件下扩散系数的变化情况。可以看出,冻融次数的增加和初始裂缝宽度的增加都会引起扩散系数的增加。式(10)的模型计算结果比文献[17]的试验结果大,模型计算值大于试验测量值,这是因为冻融的过程中裂缝附近出现剥落并在裂缝图像中产生了附加阴影,导致机器识别裂缝的密度增加,计算出的扩散系数偏大。裂缝内界面的粗糙度影响系数 ρ 增大,试验值逐渐接近模型计算值,当裂缝内界面粗糙度影响系数等于0.3时,不同盐冻条件下平均相对误差为1.6%,完成28次盐冻后不同初始裂缝条件下平均相对误差为2.9%,结果吻合较好。

4 结论

开裂是影响混凝土结构耐久性和寿命的重要因素。结合机器视觉识别裂缝,综合考虑裂缝密度、裂缝内界面粗糙度和裂缝的取向度影响,构建了开裂混凝土的代表性单元体积(REV)模型,得到了混凝土中等效扩散系数的计算公式,最后与文献中已有试验数据对比分析。结论如下:

1)利用机器视觉技术有效提取和量化REV模型所需要的裂缝几何特征,构建了开裂混凝土的REV模型,提出了开裂混凝土中氯离子等效扩散系数计算方法,计算简单,操作方便,有利于在工程结构耐久性检测中的应用。

2)模型计算得到的氯离子等效扩散系数比实验测得的氯离子扩散系数大,这是因为盐冻造成混凝土表面裂缝处剥落并在裂缝图像中产生附加阴影,引起模型计算值偏大。两组试验的平均相对误差分别为1.6%和2.9%,结果吻合较好,表明建立的等效扩散系数具有较好的可靠性。

裂缝宽度和混凝土水胶比的增大都会引起氯离子扩散系数的增加,其本质都是开裂区域体积的变化。控制混凝土结构的裂缝密度、开裂体积是耐久性设计的关键,应考虑更多的裂缝影响因素,进一步扩大预测模型的适用范围,为解决开裂混凝土的耐久性问题提供实用方法。

参考文献

[1] DU F Y, JIN Z Q, SHE W, et al. Chloride ions migration and induced reinforcement corrosion in concrete with cracks: A comparative study of current acceleration and natural marine exposure [J].

Construction and Building Materials, 2020, 263: 120099.

- [2] 张菊辉,刘颖慧,时哲敏.氯离子在开裂混凝土中的扩散特性研究[J].建筑材料学报,2018,21(2):299-303.
ZHANG J H, LIU Y H, SHI Z M. Diffusion property of chloride in cracked concrete [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 299-303. (in Chinese)
- [3] JIN L B, YU H L, WANG Z Q, et al. Effect of crack and damaged zone on chloride penetration in recycled aggregate concrete: A seven-phase mesoscale numerical method [J]. Construction and Building Materials, 2021, 291: 123383.
- [4] WANG Q N, ZHANG G S, TONG Y Y, et al. A numerical study on chloride diffusion in cracked concrete [J]. Crystals, 2021, 11(7): 742.
- [5] YOON Y S, KWON S J. Evaluation of apparent chloride diffusion coefficient and surface chloride contents of FA concrete exposed splash zone considering crack width [J]. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, 2019, 23(6): 18-25.
- [6] AL-AMEERI A S, RAFIQ M I, TSILOULOU O. Combined impact of carbonation and crack width on the chloride penetration and corrosion resistance of concrete structures [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 115: 103819.
- [7] GÉRARD B, MARCHAND J. Influence of cracking on the diffusion properties of cement-based materials: Part I : Influence of continuous cracks on the steady-state regime [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30 (1): 37-43.
- [8] PARK S S, KWON S J, JUNG S H. Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation [J]. Construction and Building Materials, 2012, 29: 183-192.
- [9] YANG K H, SINGH J, LEE B Y, et al. Simple technique for tracking chloride penetration in concrete based on the crack shape and width under steady-state conditions [J]. Sustainability, 2017, 9(2): 282.
- [10] 徐阳.基于计算机视觉的桥梁结构局部损伤识别方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
XU Y. Structural local damage detection methods for bridges based on computer vision techniques [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [11] 王一兵,包腾飞,高治鑫.基于LabVIEW+VDM的混凝土坝裂缝检测方法[J].水利水电科技进展,2021,41(5):76-82.
WANG Y B, BAO T F, GAO Z X. Crack detection method of concrete dams based on LabVIEW+VDM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 76-82. (in Chinese)

- [12] 王睿, 漆泰岳. 基于机器视觉检测的裂缝特征研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(7): 123-128.
WANG R, QI T Y. Study on crack characteristics based on machine vision detection [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(7): 123-128. (in Chinese)
- [13] ÖZGENEL Ç F, SORGUÇ A G. Performance comparison of pretrained convolutional neural networks on crack detection in buildings [C]//Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC), Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). June 28-July 1, 2017. Taipei, Taiwan, China. International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2018: 1-8.
- [14] WANG HL, DAI J G, SUN X Y, et al. Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration [J]. Construction and Building Materials, 2016, 107: 216-225.
- [15] 张士萍, 刘加平, 缪昌文. 预置表面裂缝对混凝土中氯离子传输的影响[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(4): 550-553.
ZHANG S P, LIU J P, MIAO C W. Influence of cracking on transport of chloride in concrete [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(4): 550-553. (in Chinese)
- [16] 戚翔宇, 李艳. 水胶比与裂缝对氯离子扩散影响的试验研究[J]. 四川水力发电, 2021, 40(6): 126-129.
QI X Y, LI Y. Experimental study on the influence of water-binder ratio and cracks on chloride diffusion [J]. Sichuan Water Power, 2021, 40(6): 126-129. (in Chinese)
- [17] 刘光严. 裂缝对混凝土盐冻破坏行为的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
LIU G Y. Influence of cracking on damage behavior of concrete subjected to the salt frost cycles [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)