



# 混凝土真实细观模型的生成及 氯离子传输的数值模拟

李宁<sup>1</sup>, 金祖权<sup>1</sup>, 于泳<sup>1</sup>, 叶守杰<sup>2</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 青岛地铁十三号线指挥部, 山东 青岛 266033)

**摘要:**基于改进的遗传算法和 8 邻域边界跟踪法,对混凝土断面的数字图像进行处理,得到二值图像并提取粗骨料的边界坐标;根据提取的坐标编写程序,生成浆体集料界面过渡区(ITZ),得到真实的混凝土细观模型;将得到的混凝土细观模型导入 COMSOL 软件,模拟海洋水下区氯离子侵入混凝土内部过程,得到不同时刻混凝土内部氯离子浓度云图。研究表明:使用的建模和模拟方法所得结果与长期实海暴露混凝土实验结果一致,可以用来研究和评价海洋环境下混凝土的耐久性能;ITZ 的存在会加速氯离子向混凝土内部扩散,其厚度越大,扩散过程越快,界面区厚度增大 1 倍,混凝土表观氯离子扩散系数增大 12.3%;对比真实混凝土细观模型与参数化生成的圆形随机骨料模型中氯离子传输模拟结果发现,圆形随机骨料模型中氯离子的浓度总是小于真实细观模型中氯离子的浓度。

**关键词:**数字图像处理;混凝土细观模型;氯离子传输;数值模拟

**中图分类号:**TU528      **文献标志码:**A      **文章编号:**2096-6717(2019)06-0071-09

## Generation of real mesoscopic model of concrete and numerical simulation of chloride ions transportation

Li Ning<sup>1</sup>, Jin Zuquan<sup>1</sup>, Yu Yong<sup>1</sup>, Ye Shoujie<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China;

2. Qingdao Metro Line 13 Headquarters, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China)

**Abstract:**Based on the improved genetic algorithm and 8 neighborhood boundary tracking method, this paper adopts the real concrete section digital image to obtain binary image and extract the boundary coordinates of coarse aggregate. According to the extracted coordinates, a program was directly compiled to generate ITZ, and the real concrete mesoscopic model was obtained. Then, the obtained concrete mesoscopic model was imported into COMSOL software to simulate the process of chloride ions transporting the concrete in the underwater area of the ocean, and the cloud chart of chloride ions concentration in the concrete at different time was obtained. The results show that the modeling and simulation methods used in this paper are consistent with the experimental results of

**收稿日期:**2019-03-11

**基金项目:**山东省重点研发计划(2018GHY115020);国家自然科学基金(U1806225)

**作者简介:**李宁(1995-),男,主要从事海洋环境下混凝土耐久性研究,E-mail:1006400799@qq.com。

金祖权(通信作者),男,博士,教授,E-mail:jinzuquan@126.com。

**Received:**2019-03-11

**Foundation item:**Shandong Key Research and Development Project(No. 2018GHY115020); National Natural Science Foundation of China (No. U1806225)

**Author brief:**Li Ning(1995-), main research interest: concrete durability in the marine environment, E-mail: 100640079@qq.com.

Jin Zuquan(corresponding author), PhD, professor, E-mail: jinzuquan@126.com.

long-term exposed concrete in sea, which can be used to study and evaluate the durability of concrete under marine environment. The presence of the ITZ will accelerate the diffusion of chloride ions into the concrete. The greater the thickness is, the faster the diffusion process will be. The thickness of the interface area will double, and the apparent chloride ion diffusion coefficient of concrete will increase by 12.3%. By comparing the chloride ion transport simulation results of the real concrete mesoscopic model and the circular random aggregate model generated by parametric generation, it is found that the concentration of chloride ions in the circular random aggregate model is always smaller than that in the real microscopic model.

**Keywords:** digital image processing; mesoscopic model of concrete; chloride ions transportation; numerical simulation

在细观尺度上,混凝土可视为由水泥砂浆、骨料及浆体集料界面过渡区(ITZ)组成,在细观尺度上进行研究可以较好地描述材料组成及其非均质性对混凝土力学性能和耐久性的影响,实现从微观结构到宏观性能的过度。在细观尺度上,混凝土数值建模方法有两种:一种是将混凝土骨料粒径、级配等参数化,通过程序生成混凝土的细观结构,在二维空间,其骨料形状可分为圆形、椭圆形和多边形,而在三维空间,其骨料可以分为球形、椭球形以及多面体。Wang等<sup>[1]</sup>建立二维随机骨料生成及随机分布算法,并将其应用到混凝土的本构关系研究中。王彩峰等<sup>[2]</sup>提出一种基于ANSYS三维随机骨料构筑方法,该方法可以生成任意凸多面体骨料;赵蕊等<sup>[3]</sup>采用圆形骨料,构建了骨料、浆体集料界面区的混凝土模型,并基于COMSOL软件考虑温湿度耦合作用下对混凝土氯离子传输的研究。杜成斌等<sup>[4]</sup>通过一次性形成所有同级骨料,再对其进行随机延拓,通过三维和二维生成任意形状的随机骨料,并编写2D-RAS和3D-RAS随机骨料生成软件,避免逐个投放骨料而导致计算效率低下的问题。在总结现有随机骨料模型的基础上,钟根全等<sup>[5]</sup>在骨料干涉的判断中引入交线法(Intersect Line),生成了圆形、椭圆形以及内接凸多边形的混凝土随机骨料模型。另一种是基于数字图像处理实现对真实混凝土的数值重构。最常用的方法是采用混凝土的CT图像进行处理并实现混凝土的数值模型重构。Boschmann等<sup>[6]</sup>运用图像分析技术更准确地分析出混凝土中氯离子相对于水泥的含量。姜袁等<sup>[7]</sup>基于CT图像重构了二维混凝土细观模型。匡广平<sup>[8]</sup>通过对CT图像处理实现了三维混凝土细观模型的重构。She等<sup>[9]</sup>基于XCT技术表征了泡沫混凝土结构,并对其热性能进行了模拟。Nguyen等<sup>[10]</sup>重构了泡沫混凝土的三维细观结构,并用ABAQUS有限元软件进

行了原位试验仿真。但是,CT图像的获取受到试件尺寸、形状和环境等限制,成本较高。

为重构真实的骨料、避免混凝土CT图像获取成本高等缺点,本文从混凝土细观尺度上入手,采用数码相机拍摄混凝土数字图像,通过对混凝土截面图像处理,提取粗骨料的边界坐标,实现真实混凝土细观模型的重构;在生成细观模型基础上编写程序构造混凝土浆体集料界面区(ITZ);基于上述数值混凝土模型,研究其在海洋水下区的氯离子传输过程。

## 1 混凝土数字图像处理及其有限元(FEM)模型生成

### 1.1 混凝土数字图像预处理

图像预处理的目的是得到高质量的二值图像。混凝土数字图像处理过程如图1所示。首先,在混凝土断面喷洒酚酞试剂以增强骨料和砂浆的对比度;利用数码相机对 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 的C50混凝土断面进行拍照,得到数字图像。数字图像是RGB类型的图像,包含红、绿、蓝3种基本颜色<sup>[11]</sup>。考虑高像素图片经过处理之后再导入有限元软件会极大地增加软件计算量。因此,选用 $400 \times 400$ 分辨率进行图像后续处理。然后,把得到的数字图像导入MATLAB。最后,对图像进行灰度处理、分割、空洞填充、去噪以及形态学处理等。

1.1.1 图像灰度化及其分割 首先,将分辨率为 $400 \times 400$ 的RGB图像灰度化得到灰度图像(像素值为 $0 \sim 255$ ),如图2(b)所示。基于灰度值,混凝土中的骨料已经被清晰地显示出来。然后,将得到的灰度图像进行图像分割,得到二值图像(像素值为0和1),水泥浆体被赋予0值,显示黑色,而骨料将被赋予1值,显示白色。二值化原理见式(1)。

$$g(i, j) = \begin{cases} 0 & f(i, j) < H \\ 1 & f(i, j) \geq H \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(i, j)$  为灰度图像第  $i$  行,第  $j$  列的像素; $H$  为灰度分界的阈值。

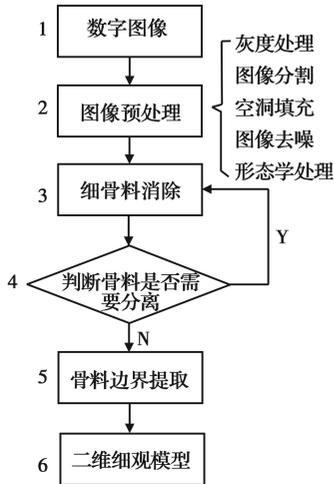


图 1 图像处理过程  
Fig. 1 Image processing

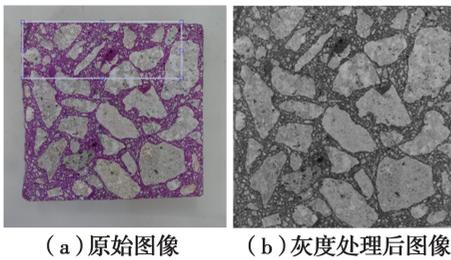


图 2 混凝土断面的灰度化处理  
Fig. 2 Grayscale image of concrete section

传统阈值是在画出灰度图像的灰度直方图之后,人为地在灰度直方图的“波谷”中选出,具有较大的主观性。本文采用智能算法中的遗传算法,求解最优阈值<sup>[12]</sup>。遗传算法的流程如图 3 所示,与传统遗传算法相比,引入邻域搜索算子 Reverse 对其改进,提高算法收敛速度。

分割完成的图像如图 4(a)所示。从图 4(b)中可以看到,在骨料内部有许多空洞,这是因为骨料的矿物成分较多,有些矿物成分和水泥浆体的颜色类似。为消除这些空洞,采用内部填充的方法,填充完成之后的图像如图 4(c)所示,从图 4(c)中可以看出,所有骨料已经被填充好,骨料和砂浆有明显的分界。

1.1.2 图像滤波与形态学处理 图像在采集和传输的过程中,外界干扰产生的噪声使图像变得模糊。通过比较各种滤波方法的特点,采用中值滤波对图片进行去噪处理。在进行中值滤波时,其窗口的形状和尺寸决定着滤波结果。因此,选择方形窗口,对采用不同模板大小的中值滤波后的图像进行比较,如

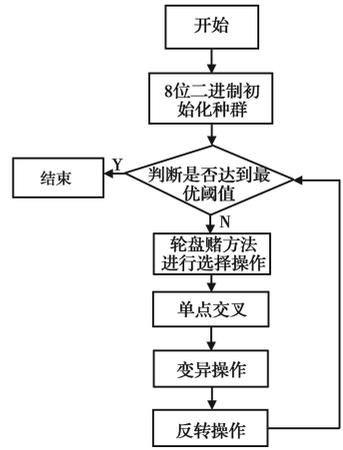


图 3 遗传算法流程图  
Fig. 3 Flow chart of GA

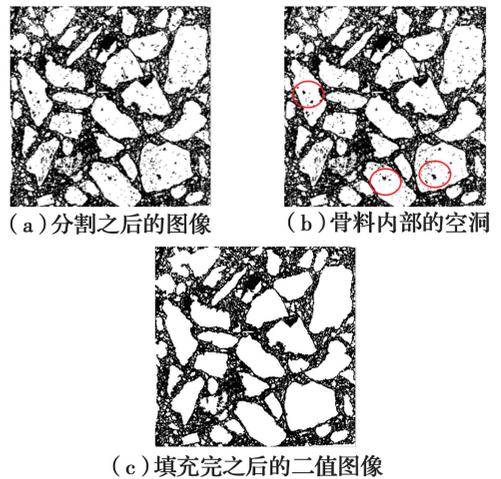


图 4 分割、填充后的混凝土断面二值图像  
Fig. 4 Binary image of concrete section after segmentation and filling

图 5 所示。从图 5 中可以看出,随着模板的增大,尽管越来越多的杂质被去除掉,但是骨料也会重合起来,为了便于边界提取,选择了  $2 \times 2$  模板。

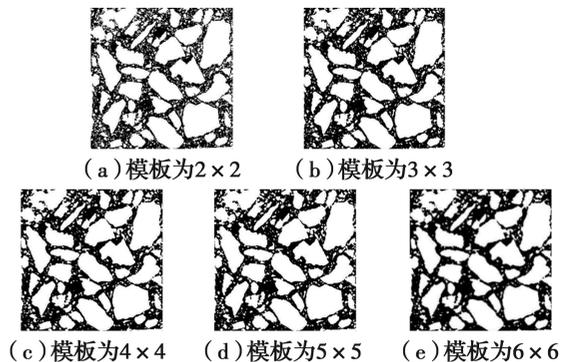


图 5 不同大小模板滤波比较  
Fig. 5 Comparison of different filtering template size

从图 5(a)中可以看出,经过中值滤波之后仍然

存在较多杂质,且骨料边缘粗糙,因此,采用形态学的处理方法继续对二值图像进行开运算处理。采取结构元素形状为圆形的模板,半径为2的像素矩阵,得到的图像如图6所示。与图5(a)对比发现,图像中大部分杂质被去除,而且骨料的边界变得光滑。

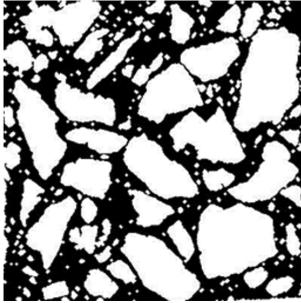
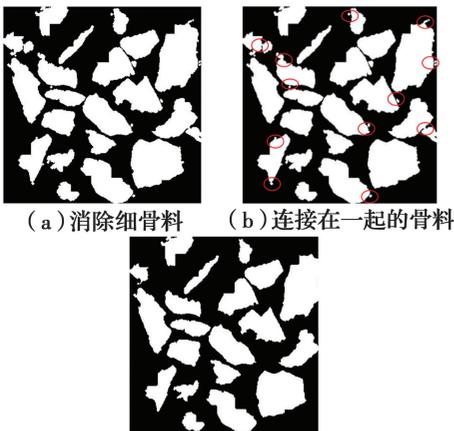


图6 图像开运算

Fig. 6 Image after open operation

1.1.3 分离和去除细骨料 混凝土中直径小于4.75 mm的骨料为细骨料,将其转换成像素面积去除掉,如图7(a)所示,细骨料已经被全部去除。但在识别过程中,有些骨料的边界相互渗透,连接在一起,如图7(b)红色标注所示,考虑人工识别出来之后将其分离,但人工识别、分离耗时较长,在识别出相互连接的骨料之后,采用腐蚀算法将其分离。分离之后执行图1中程序4,再一次判断是否有细骨料存在;如果有,执行图1中程序3,再一次消除细骨料,最终得到的二值图像如图7(c)所示。



(a) 消除细骨料 (b) 连接在一起的骨料

(c) 最终分离完成的二值图像

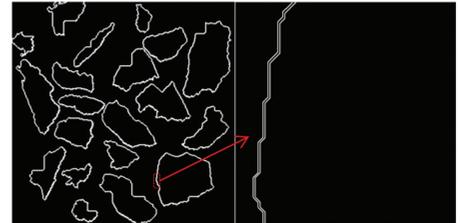
图7 消除细骨料后图像

Fig. 7 Image after fine aggregate elimination

## 1.2 混凝土中骨料边界提取以及界面生成

图像的数据有矩阵、链码、拓扑和关系结构,其中,链码是用来描述目标图像的边界。链码按照标准方向的斜率分为4向链码和8向链码。编写了8

邻域(8向链码)跟踪算法,提取骨料坐标并在MATLAB画出其形状,如图8(a)所示。根据提取的坐标直接在MATLAB中编写程序生成ITZ,如图8(b)所示。这样就更真实地再现了实际混凝土的微观模型,从而为混凝土中离子传输的数值模拟提供依据。



(a) 骨料形状 (b) 浆体集料界面区

图8 混凝土微观模型

Fig. 8 Mesoscopic model of concrete

## 2 饱和状态下混凝土中氯离子传输模拟

### 2.1 饱和状态下混凝土中氯离子传输模型

海洋水下区的混凝土结构,如跨海大桥的桥墩、基础等长期浸水,一般处于完全饱和状态。氯离子在饱和状态下的运输机制以扩散为主<sup>[13]</sup>,其传输方程可以用Fick第二定律来描述,如式(2)所示。

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2)$$

式中: $C$ 为混凝土内部氯离子含量,通常用单位体积混凝土中氯离子的百分含量来表示; $D$ 为有效扩散系数,通常由试验测定。但实际环境中的混凝土并不完全符合Fick第二定律的恒定扩散系数和恒定边界条件,因此,定义表观扩散系数 $D_{app}$ 来描述传输系数<sup>[14]</sup>。

首先,混凝土的扩散系数随着龄期的增加而有所降低。学者们认为扩散系数随时间衰减的过程关系式可以描述为式(3)<sup>[14]</sup>。

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^n \quad (3)$$

式中: $D_{ref}$ 为参考时间 $t_{ref}$ 时所对应的氯离子扩散系数,一般取28 d时的扩散系数; $n$ 为时间衰减因子。欧洲DuraCrete<sup>[15]</sup>的文件中指出,时间因子 $n$ 不仅与胶凝材料的种类有关,而且与环境条件有关,见表1。

表 1 DuraCrete 中时间因子的取值

Table 1 Value of time factor in DuraCrete

海洋环境	胶凝材料			
	硅酸盐水泥	粉煤灰	矿渣	硅粉
水下区	0.30	0.69	0.71	0.62
潮汐、浪溅区	0.37	0.93	0.60	0.39
大气区	0.65	0.66	0.85	0.79

其次,温度也会对混凝土中氯离子的扩散产生显著影响,根据美国 Life-365 标准设计程序<sup>[16]</sup>,温度对氯离子扩散系数的影响见式(4)。

$$D(T) = D_{\text{ref}} \cdot \left[ \exp\left(\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right) \right] \quad (4)$$

式中: $U$ 为扩散过程中离子的活化能,35 000 J/mol; $R$ 为摩尔气体常数,取 8.314 J/mol·K。

混凝土服役过程中,其表面氯离子浓度随着时间增加而增加。表面氯离子浓度与环境条件、混凝土的水胶比及胶凝材料的种类有关<sup>[14]</sup>,见式(5)。

$$C_s = A_c \cdot W/B \cdot \gamma_{c,cl} \quad (5)$$

式中: $A_c$ 为拟合回归系数,取值见表 2; $W/B$ 为水胶比; $\gamma_{c,cl}$ 为单位体积混凝土中氯离子的百分含量。

表 2  $A_c$  取值Table 2 Value of  $A_c$ 

海洋环境	胶凝材料			
	硅酸盐水泥	粉煤灰	矿渣	硅粉
水下区	10.30	10.80	5.06	12.50
潮汐、浪溅区	7.76	7.45	6.77	8.96
大气区	2.57	4.42	3.05	3.23

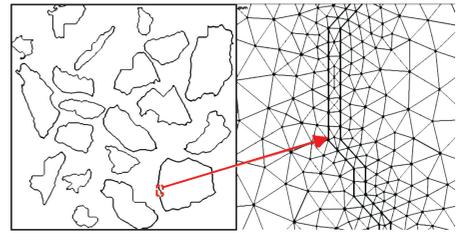
## 2.2 混凝土中氯离子传输模拟

将经过图像处理的真实混凝土二维模型,设置浆体集料界面区厚度为 30  $\mu\text{m}$ ,之后导入 COMSOL 软件,并进行网格划分,如图 9 所示。Garboczi 等<sup>[17]</sup>根据实验结果采用数值方法提出了砂浆基体的氯离子扩散系数与其孔隙率之间的拟合关系

$$D_m = D_0 \cdot (0.001 + 0.07\varphi + 1.8H \cdot (\varphi - \varphi_{th})^3) \quad (6)$$

式中: $D_m$ 为砂浆的氯离子扩散系数; $D_0$ 为氯离子在水溶液的扩散系数,当温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ 时, $D_0 = 2.032 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{s}$ ; $H$ 为 Heaviside 函数,当  $\varphi > \varphi_{th}$ 时, $H = 1$ ,否则, $H = 0$ ; $\varphi_{th}$ 为孔隙率临界值,取 0.18。同时,参考刘庆<sup>[18]</sup>实验结果,海洋环境下水胶比为

0.35 的 C50 混凝土砂浆扩散系数  $4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。根据文献<sup>[19]</sup>界面过渡区氯离子扩散系数  $D_{ITZ}$ 为砂浆扩散系数的 0~100 倍,本文取  $D_{ITZ} = 4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。尽管不同种类粗骨料的水渗透性不同<sup>[20]</sup>,但海工混凝土的中粗骨料对氯离子扩散过程有一定的“稀释效应”,其扩散系数比砂浆基体的扩散系数低几个数量级<sup>[13]</sup>,因此,取粗骨料氯离子扩散系数  $D_a = 4 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ 。



(a) 混凝土细观骨料模型 (b) 网格划分

图 9 混凝土有限元模型

Fig. 9 FEM of concrete

目前,高性能海工混凝土大多掺加粉煤灰,根据表 1 扩散系数的龄期系数  $n = 0.69$ 。青岛年平均气温为 12.7  $^{\circ}\text{C}$ ,其氯离子扩散系数的活化能取 3 500 J/mol,因此,温度影响因子  $k_T = 0.69299$ 。粉煤灰混凝土在水下区表面氯离子浓度  $C_s$ ,根据 DuraCrete 模型, $A_c$  取值为 10.8,混凝土  $W/B$  为 0.35,计算其表面氯离子浓度  $C_s = 0.948\%$ 。模拟 100 年内青岛海洋水下区混凝土中氯离子传输过程,如图 10 所示。从图 10 中可以看到,随着腐蚀龄期的增加,氯离子的渗透深度增大,混凝土表层氯离子浓度逐渐增大;由于粗骨料的氯离子扩散系数远小于砂浆及界面过渡区的扩散系数,所以,粗骨料会对氯离子的传输形成阻碍作用;氯离子通过大骨料以及骨料周界面区传输后,在骨料后方会逐渐形成氯离子传输前锋。

为进一步表征氯离子随时间的侵入过程,选取混凝土左边缘为横坐标的原点,绘制氯离子浓度随时间演变线图,其结果如图 11(a)所示。从图 11(a)中可以明显看出,随着侵蚀时间的增加,在同一位置处的氯离子的浓度在不断增大;混凝土氯离子浓度仍然随深度增加而逐渐降低,且在某一深度逐渐趋于稳定。课题组针对 C50 混凝土开展的实海暴露试验结果如图 11(b)所示。显然,模拟结果与实际结果具有较好的相关性。

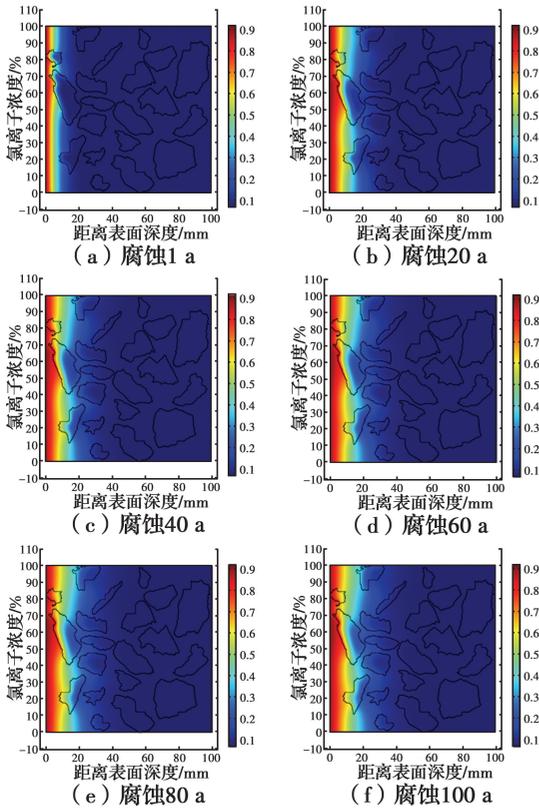


图 10 浆体集料界面区为  $30\ \mu\text{m}$  不同腐蚀龄期氯离子浓度分布云图

Fig. 10 Cloud chart of chloride ion concentration distribution at different corrosion ages with ITZ thickness of  $30\ \mu\text{m}$

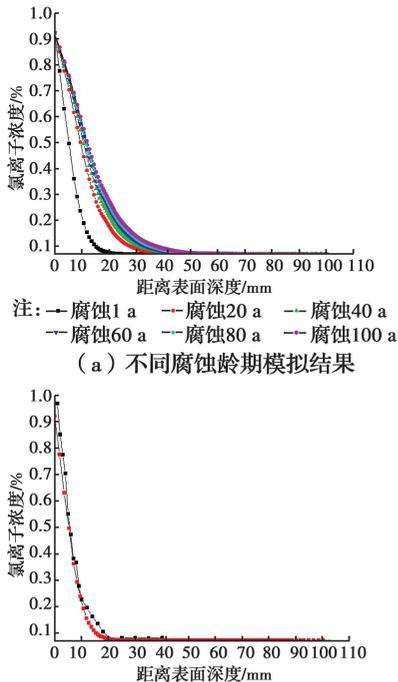


图 11 氯离子浓度演变

Fig. 11 Evolution of chloride ions concentration

### 2.3 浆体集料界面区对混凝土中氯离子传输影响

在混凝土细观模型重构之后,假定浆体集料界面区厚度(ITZ)为  $0$ 、 $30$ 、 $60\ \mu\text{m}$ ,研究浆体集料界面区厚度对混凝土中氯离子传输影响。模拟海洋水下区腐蚀  $100\ \text{a}$  混凝土中氯离子传输过程,其氯离子浓度云图如图 10、图 12、图 13 所示。由于浆体集料界面区的扩散系数比砂浆和骨料的扩散系数大,随着浆体集料界面区厚度的增大,同一深度混凝土的氯离子浓度增大。

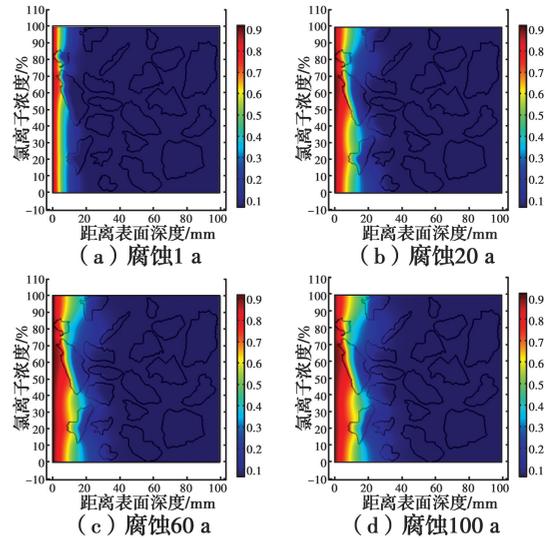


图 12 无界面区不同腐蚀龄期氯离子浓度分布云图

Fig. 12 Cloud chart of chloride ion concentration distribution at different corrosion ages with ITZ thickness of  $0\ \mu\text{m}$

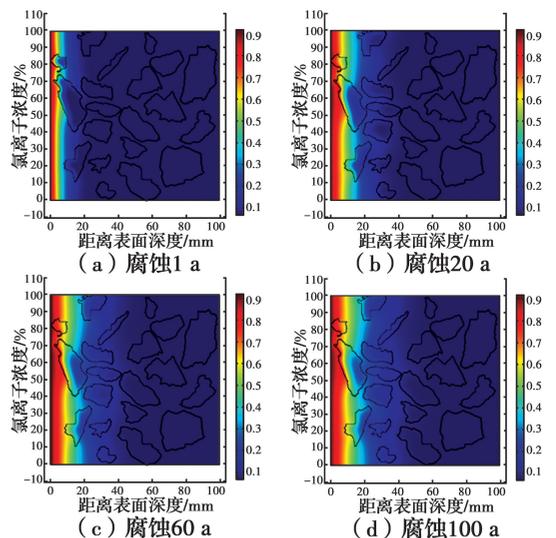


图 13 浆体集料界面区厚度为  $60\ \mu\text{m}$  不同腐蚀龄期氯离子浓度分布云图

Fig. 13 Cloud chart of chloride ion concentration distribution at different corrosion ages with ITZ thickness of  $60\ \mu\text{m}$

选取混凝土左边缘为纵坐标的原点,绘制  $100\ \text{a}$

不同界面区厚度混凝土的氯离子浓度分布曲线,如图 14 所示。在表面深度 10 mm 以内,3 条曲线基本重合,浆体集料界面过渡区对氯离子传输影响小;当距离表面大于 10 mm 时,界面过渡区厚度增加,混凝土同一深度氯离子浓度明显增加,氯离子传输距离更远。

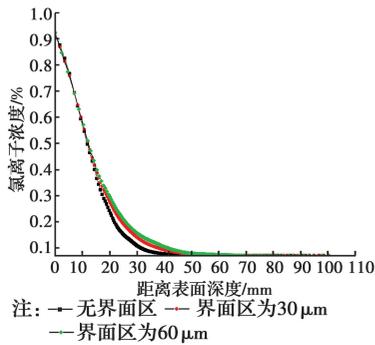


图 14 腐蚀龄期为 100 a,不同浆体集料界面区厚度  
氯离子浓度分布

Fig. 14 Concentration distribution of chloride ions with  
different ITZ thickness when the corrosion age is 100 years

对图 14 中 3 条曲线按照 Fick 第二定律拟合得到无界面区,以及界面区厚度为  $30\ \mu\text{m}$  和  $60\ \mu\text{m}$  混凝土的表观氯离子扩散系数分别为  $0.03583 \times 10^{-12}$ 、 $0.04575 \times 10^{-12}$ 、 $0.0522 \times 10^{-12}\ \text{m}^2/\text{s}$ 。由此可知,浆体集料界面区厚度越大,混凝土氯离子传输速度越快;界面过渡区提高一倍,其表观氯离子扩散系数增加了 12.3%。

## 2.4 两种混凝土细观模型对氯离子传输影响

对真实混凝土细观模型的粗骨料进行像素面积计算,得出粗骨料的体积率为 41.23%。参照赵蕊等<sup>[4]</sup>建立圆形随机骨料模型的方法,通过设定相同的浆体集料界面区厚度和骨料粒径分别为 5~10 mm、10~15 mm、15~20 mm,并控制骨料体积率为 41%,编写算法生成随机骨料模型,如图 15 所示。导入 COMSOL 软件,给定与 2.2 节相同的计算参数,模拟 100 a 内混凝土氯离子传输,其浓度分布云图,如图 16 所示。

比较图 16 和图 10,采用两种细观模型获得混凝土中氯离子传输过程基本一致。因此,参数化生成的随机骨料模型也可用于模拟混凝土中氯离子传输过程。

为更好地对比两个混凝土细观模型对氯离子传

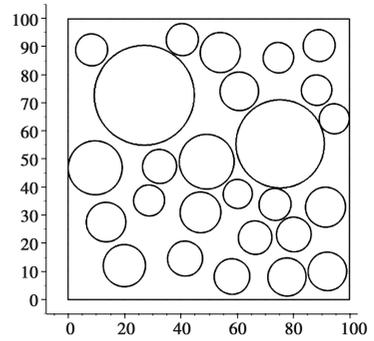


图 15 圆形随机骨料

Fig. 15 Circular random aggregate

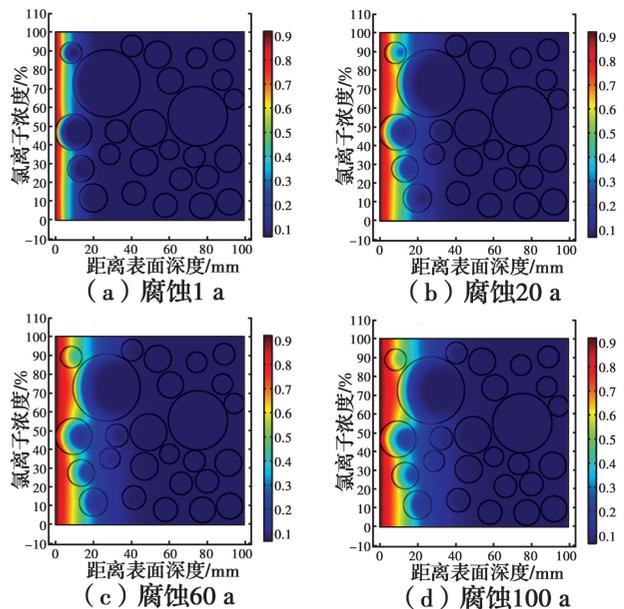


图 16 圆形随机骨料模型不同腐蚀龄期氯离子浓度分布云图

Fig. 16 Cloud chart of chloride ion concentration distribution  
of circular random aggregate model at different corrosion ages

输的影响,在腐蚀龄期相同的条件下,绘制氯离子浓度随时间演变线图,如图 17 所示。

由图 17 可知,当腐蚀龄期相同时,圆形随机骨料模型混凝土中氯离子浓度小于真实细观模型混凝土中氯离子的浓度。原因是:1)圆形随机骨料模型中粗骨料位置是随机的,在扩散边缘处的骨料体积越大,其粗骨料对混凝土内氯离子传输的阻碍作用越大;2)真实混凝土细观模型粗骨料比较“瘦长”,且在浇筑的时候骨料朝向随机,在相同位置处粗骨料体积率小,其对氯离子的传输阻碍作用要更小。因此,采用参数化骨料的细观模型虽然可以较好地模拟混凝土中氯离子的传输过程,但与真实骨料模型仍存在一定差异。

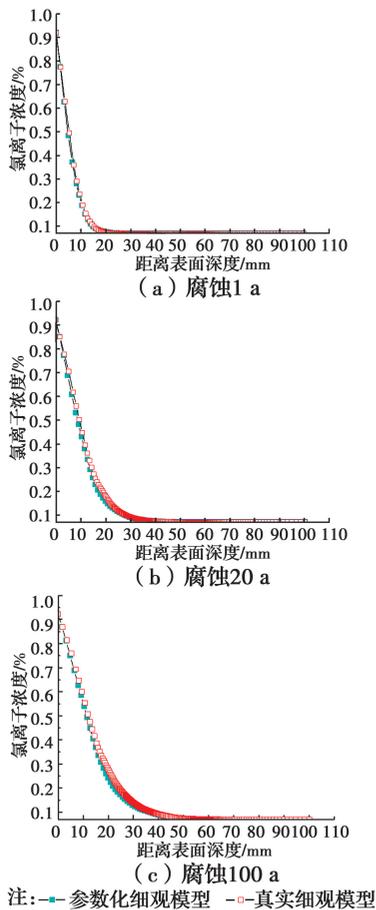


图 17 不同细观模型氯离子浓度随时间的演变图

Fig. 17 Evolution of chloride ions concentration in different mesoscopic model

### 3 结论

1) 采用智能算法对真实混凝土断面的数码相机图形进行图像分割等预处理, 可得到与原彩色图像吻合较好的二值图像。基于 8 邻域跟踪算法, 对二值图像进行粗骨料坐标提取; 编写算法生成粗骨料的界面过渡区(ITZ), 实现真实混凝土断面三相细观模型的建立。

2) 将真实混凝土断面细观模型导入 COMSOL 有限元软件, 考虑龄期系数、表面氯离子浓度变化及温度对氯离子扩散的影响, 实现海洋水下区混凝土氯离子传输过程模拟, 模拟结果与长期实海暴露混凝土实验结果一致。

3) 粗骨料会对混凝土氯离子的传输形成阻碍作用; 氯离子通过大骨料以及骨料周界面区传输后, 在骨料后方会逐渐形成氯离子传输前锋。在距离表面小于 10 mm 左右时, 浆体集料界面区厚度对氯离

子的传输影响较小; 当距离大于 10 mm 时, 浆体集料界面区厚度增加将加速氯离子向混凝土内部传输; 界面区厚度提高 1 倍, 混凝土表观氯离子扩散系数提高 12.3%。

4) 通过真实混凝土细观模型与参数化生成的圆形随机骨料模型对比可以得出结论, 圆形随机骨料模型可实现混凝土中氯离子传输过程模拟, 但圆形随机骨料模型混凝土中氯离子浓度小于真实细观模型混凝土中氯离子的浓度。

### 参考文献:

- [1] WANG Z M, KWAN A K H, CHAN H C. Mesoscopic study of concrete I: Generation of random aggregate structure and finite element mesh [J]. Computers & Structures, 1999, 70(5): 533-544.
- [2] 王彩峰, 马学强. 基于 ANSYS 的混凝土三维随机骨料生成方法研究[J]. 河南城建学院学报, 2018, 27(2): 13-18.  
WANG C F, MA X Q. Research on 3D random aggregate generation method of concrete based on ANSYS [J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2018, 27(2): 13-18. (in Chinese)
- [3] 赵蕊, 金祖权, 曹杰荣, 等. 海洋环境中温湿度变化对混凝土氯离子传输研究[J]. 海洋工程, 2018, 36(1): 99-106.  
ZHAO R, JIN Z Q, CAO J R, et al. Numerical simulation of chloride ions transportation considering temperature and humidity in marine environment [J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(1): 99-106. (in Chinese)
- [4] 杜成斌, 孙立国. 任意形状混凝土骨料的数值模拟及其应用[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 662-667, 673.  
DU C B, SUN L G. Numerical simulation of concrete aggregates with arbitrary shapes and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(6): 662-667, 673. (in Chinese)
- [5] 钟根全, 李丽娟, 刘锋, 等. 混凝土二维随机骨料的数值模拟[J]. 混凝土, 2008(9): 70-73.  
ZHONG G Q, LI L J, LIU F, et al. Numerical simulation of two-dimensional random aggregate in concrete [J]. Concrete, 2008(9): 70-73. (in Chinese)
- [6] BOSCHMANN KÄTHLER C, ANGST U M, WAGNER M, et al. Image analysis for determination

- of cement content in concrete to improve accuracy of chloride analyses [J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 99: 1-7.
- [7] 姜袁, 柏巍, 彭刚. 基于CT图像的混凝土细观结构边缘检测技术[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2008, 41(1): 77-80.
- JIANG Y, BAI W, PENG G. Edge detection of concrete mesostructure with CT image [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2008, 41(1): 77-80. (in Chinese)
- [8] 匡广平. 基于三维细观模型混凝土应变率效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- KUANG G P. Research on strain rate of concrete based on 3-D meso-scale model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] SHE W, ZHANG Y S, JONES M R. Three-dimensional numerical modeling and simulation of the thermal properties of foamed concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50: 421-431.
- [10] NGUYEN T, GHAZLAN A, KASHANI A, et al. 3D meso-scale modelling of foamed concrete based on X-ray computed tomography[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 188: 583-598.
- [11] 杨丹, 赵海滨, 龙哲, 等. MATLAB图像处理实例详解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- YANG D, ZHAO H B, LONG Z, et al. Detailed explanation of image processing example in MATLAB [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [12] 温正, 孙华克. MATLAB智能算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- WEN Z, SUN H K. MATLAB intelligent algorithms [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017. (in Chinese)
- [13] 吴静新. 混凝土内氯离子传输模型及其数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- WU J X. Modelling and simulation of chloride ions transmission in concrete [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] 金伟良, 袁迎曙, 卫军, 等. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- JIN W L, YUAN Y S, WEI J, et al. Durability theory and design method of concrete structure under chloride environment [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [15] ENGELUND S, EDVARDSEN C, MOHR L. General guidelines for durability design and redesign, DURACRETE: probabilistic performance based durability design of concrete structures [R]. EU-Project (Brite EuRam III) No. BE95-1347, Repore R15, 2000.
- [16] BENTZ E C, THOMAS M D A. Life-365: Service life prediction Model™-Computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides [R/OL]. [2018-09-18]. <http://www.doc88.com/p-9075936779159.html>.
- [17] GARBOCZI E J. Permeability, diffusivity, and microstructural parameters: A critical review [J]. *Cement and Concrete Research*, 1990, 20(4): 591-601.
- [18] 刘庆. 水分和氯离子在水泥砂浆中的传输机理研究[D]. 山东青岛: 青岛理工大学, 2016.
- LIU Q. Research on the transport mechanism of moisture and chloride ions in cement mortar [D]. Qingdao, Shandong: Qingdao Tehcnology University, 2016. (in Chinese)
- [19] HOBBS D W. Aggregate influence on chloride ion diffusion into concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(12): 1995-1998.

(编辑 邓云)