

网络出版时间:2017-03-31 16:08

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.05.030

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170331.1608.060.html

基于 MCM 骨料模型的氯离子 侵蚀混凝土模拟研究

于磊^a,徐凤^b,刘文祥^a,刘潇潇^a

(湖南工学院 a 建筑工程与艺术设计学院, b 数理科学与能源工程学院, 湖南 衡阳 421002)

【摘要】【目的】研究混凝土中氯离子的扩散特性和有效数值模拟方法。【方法】基于 FICK 第二定律和 MCM(Monte Carlo method, 蒙特卡洛法)生成包含界面过渡区的随机骨料, 利用有限元计算方法进行混凝土中氯离子扩散的数值模拟, 采用三相复合胞体、随机骨料 2 种不同的计算模型, 对扩散过程分析中的重要参数即氯离子扩散系数进行计算, 并将 2 种模型计算方法各自所得的 3 组扩散系数分别与已有 3 组不同骨料体积率试验结果进行比较。【结果】数值计算结果与试验结果一致性良好, 三相复合胞体、随机骨料 2 种模型之间的复杂程度不同也决定了两者计算的精确性不同, 其中随机骨料模型的计算结果更为准确, 用其得到的 3 组计算结果(骨料体积率分别为 10%, 20% 和 30%)与试验结果的相对误差分别仅为 1.36%, 0.30% 和 1.75%。【结论】带界面过渡区的随机骨料模型能够很好地应用于混凝土的数值建模, 可应用于混凝土侵蚀性研究。

【关键词】混凝土侵蚀; 氯离子扩散系数; 数值模拟; 随机骨料模型

【中图分类号】TU528.33

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2017)05-0221-07

Simulation of chloride diffusion in concrete based on MCM aggregates model

YU Lei^a, XU Feng^b, LIU Wenxiang^a, LIU Xiaoxiao^a

(a School of Architecture and Engineering, b School of Mathematics and Physics Energy Science Engineering,
Hunan Institute of Technology, Hengyang, Hunan 421002, China)

Abstract: 【Objective】This study analyzed the characteristics of chloride diffusion in concrete and obtained effective numerical simulation method. 【Method】Based on Fick's second law and Monte Carlo method (MCM), a concrete model for simulation of chloride diffusion was generated by random aggregates containing interfacial transition zone (ITZ). Finite element method (FEM) was used to simulate the chloride diffusion and diffusion coefficient was calculated using three-phase composite circle model and random aggregates model. 【Result】The simulation results agreed with experimental results. Due to the complexity of random aggregates model, it obtained more accurate result compared to three-phase composite circle model. The relative errors of three groups of simulation results with volume ratios of 10%, 20%, and 30% were merely 1.36%, 0.30% and 1.75%, respectively. 【Conclusion】The random aggregates model with ITZ can be used in numerical simulation of concrete, and it is feasible to investigate diffusion in concrete.

Key words: concrete corrosion; chloride diffusion coefficient; numerical simulation; random aggregate model

【收稿日期】2016-03-05

【基金项目】湖南工学院科研资助项目(HY14004, HY14006); 湖南省教育厅科学研究项目(16C0439, 16C0431)

【作者简介】于磊(1986—), 男, 黑龙江大庆人, 讲师, 硕士, 主要从事混凝土结构设计与耐久性研究。E-mail: yulei_hnit@163.com

结构服役期内的混凝土耐久性问题已成为影响混凝土结构有效使用的主要原因^[1-2]。在混凝土耐久性问题中,以氯盐、硫酸盐等盐类侵蚀混凝土进而腐蚀钢筋,最终影响结构性能的问题尤为突出^[1-3],亟待加强恶劣环境因素对混凝土耐久性能影响的研究^[4]。

在氯盐侵蚀研究中,氯离子扩散系数是表征氯离子运动速率的重要参数,能够直观反映混凝土对氯离子侵蚀的抵抗能力,并对确定混凝土结构耐久性能有重要的参考作用。因此,混凝土中氯离子扩散系数的确定是混凝土耐久性能研究中一项非常重要的工作^[5-6]。目前关于氯离子扩散系数的确定方法主要有试验和理论计算两大类:试验方法主要是在各种环境条件下进行氯离子扩散试验,取样测定混凝土内各处的氯离子浓度^[7-9];理论计算方法主要是针对氯离子扩散方程的参数进行修正^[10-12]。有限元方法虽然也可归入理论计算,但由于其并不常常推导参数公式,而是根据实际应用条件建立仿真模型,因此应用范围更广^[13-15],行之有效的仿真模型对氯离子扩散规律的研究作用巨大,并影响氯离子扩散系数计算的准确性和高效性。

本研究采用 MCM(Monte Carlo method,蒙特卡洛法)随机骨料模型,以骨料比例对混凝土模型建立的影响作为建模重点,并通过有限元计算对混凝土内的氯离子扩散规律进行模拟,采用三相复合胞体、随机骨料 2 种计算模型进行氯离子扩散系数的数值计算,最后通过与试验结果的比较来验证模型的可行性,以期 MCM 在混凝土耐久性分析中的应用提供参考。

1 氯离子扩散系数数值计算原理

混凝土内的氯离子扩散一般认为服从 FICK 第二定律,该定律是在热传导基本理论——傅里叶定律的基础上类比推导而来的。混凝土中的氯离子扩散过程与热量的传导过程类似,在流体静止且一维扩散时,氯离子的扩散方程为:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: $C(x,t)$ 表示 x 深度处 t 时刻的氯离子浓度, x 为深度, t 为时间, D 为扩散系数。

公式(1)即为 FICK 第二定律。应用 FICK 第二定律时需要满足几个基本假定:混凝土为半无限的均质可渗透体;氯离子在混凝土中扩散时,仅有扩散而无任何反应发生;氯离子在混凝土中的扩散系数 D 为定值。在满足上述假定后,给出 $C(0,t) =$

C_s 和 $C(x,0) = C_0$ 的初始条件与边界条件,即可得到不同时间不同深度下的氯离子浓度值,即 FICK 第二定律解的表达式(%):

$$C(x,t) = C_0 + (C_s - C_0)[1 - \operatorname{erf}(x/2\sqrt{Dt})] \quad (2)$$

式中: C_s 表示氯离子在混凝土外表面处的浓度, C_0 为氯离子在初始时刻的浓度, $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$ 为误差函数。

离子扩散与热量传导在数学表达上具有相似性,关于氯离子在混凝土中的扩散问题,在有限元领域可以应用热传导^[16]的模拟方法解决。

2 计算模型

混凝土是由多种性质不同的材料混合而成的复合材料,将混凝土看作均质材料是不符合实际情况的。为了有效模拟混凝土性能,建立多相复合的混凝土模型是十分必要的。本研究建立了以下 2 种多相复合混凝土模型用于计算分析。

2.1 三相复合胞体模型

将混凝土考虑为骨料、界面和基体组成的三相复合体,建立用 3 种元素组成 1 种新元素的复合模型。即将混凝土看作 1 个新的单元胞体,其由 3 种组成要素按比例和顺序形成^[17]。

设定骨料面积比率 A_a ,则单位面积内的骨料个数 N_a 的表达式为:

$$N_a = \frac{A_a}{\pi R_c^2} = \begin{cases} \frac{2A_a(D_{\max}^{1.5} - D_{\min}^{1.5})}{\pi(D_{\max}^2 D_{\min}^{1.5} - D_{\max}^{1.5} D_{\min}^2)}, n=2.5; \\ \frac{3A_a(D_{\max}^2 - D_{\min}^2)}{\pi D_{\max}^2 D_{\min}^2 (\ln D_{\max} - \ln D_{\min})}, n=3. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$ 、 R_c 分别表示骨料的直径、最小直径和骨料半径; n 为计算常数,当为 Fuller 骨料级配时 $n=2.5$,当为等体积骨料级配时 $n=3$ 。

根据几何统计学, Lu 等^[18]给出了界面面积率(A_{ITZ})的计算公式为:

$$A_{ITZ} = 1 - A_a - (1 - A_a) \exp[-\pi N_a(t_1 h + t_2 h^2)]; \quad (4)$$

$$t_1 = \frac{2R_c A_a}{1 - A_a}, t_2 = \frac{1}{1 - A_a} + \frac{\pi N_a R_c^2}{(1 - A_a)^2} \quad (5)$$

式中: h 为界面过渡区的厚度; t_1 、 t_2 为计算参数。

另外:

$$R_c^k = \begin{cases} \frac{D_{\min}^2 D_{\max}^2 (\ln D_{\max} - \ln D_{\min}) H_3}{2(D_{\max}^2 - D_{\min}^2)}, n=3, k=2; \\ \frac{(n-1)(D_{\min}^k D_{\max}^{n-1} - D_{\min}^{n-1} D_{\max}^k) H_{k+1}}{2^k (n-k-1)(D_{\max}^{n-1} - D_{\min}^{n-1})}, \text{其他情况} \end{cases} \quad (6)$$

$$H_{k+1} = \begin{cases} \frac{(k-1)!!}{k!!}, & k \text{ 为奇数}; \\ \frac{(k-1)!!}{k!!} \frac{\pi}{2}, & k \text{ 为偶数}。 \end{cases} \quad (7)$$

式中: H_{k+1} 为计算参数, k 为正整数, H_3 为按公式(7)计算所得参数。

则混凝土基体所占面积率 A_m 为:

$$A_m = 1 - A_a - A_{ITZ}。 \quad (8)$$

模型中,令 r_a 为骨料圆的半径, r_b 为界面过渡区最外侧半径, r_c 为模型区域半径, r_a 、 r_b 和 r_c 的关系为:

$$\begin{cases} \frac{r_a^2}{r_c^2} = A_a, \\ \frac{r_b^2}{r_c^2} = A_a + A_{ITZ}。 \end{cases} \quad (9)$$

由上面的理论介绍,扩展到三维就有三相复合球体混凝土模型。球体的界面体积率 V_{ITZ} , 骨料体积率 V_a 与界面体积率 V_m 的关系可表达为:

$$V_m = 1 - V_a - V_{ITZ}。 \quad (10)$$

三相复合球胞体模型中,同样有骨料圆的半径 r_a , 界面过渡区最外侧半径 r_b 和模型区域半径 r_c , 只是 r_a 、 r_b 和 r_c 的关系与二维不同,即

$$\begin{cases} \frac{r_a^3}{r_c^3} = V_a, \\ \frac{r_b^3}{r_c^3} = V_a + V_{ITZ}。 \end{cases} \quad (11)$$

2.2 骨料随机分布模型

利用 MCM 随机分布理论将骨料随机投放到基体中,产生三相分布与实际混凝土十分接近的模型。将混凝土看作由粗骨料、基体和界面过渡区组成的复合体,根据混凝土的各组分配比和骨料级配情况,利用随机方法得到混凝土复合体模型,并将骨料、水泥砂浆基体、过渡区的各相材料特性分配到相应的单元,之后再划分有限元网格,可用来完成模拟计算的有限元模型。因此,混凝土各组分材料特性差异将是模型有效用于计算模拟的关键。

不同粒径骨料所占混凝土总体积的比例可用分配曲线来表示,在认为骨料颗粒形状近似为球形时,根据如下所示的 Fuller 抛物线能够得到骨料颗粒在三维情况下的级配曲线。

$$Y = 100 \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^{1/2}。 \quad (12)$$

式中: Y 为某一直径骨料的体积率, D 为骨料直径, $D_{\max}$ 为最大骨料直径。

根据 Fuller 公式将三维级配曲线公式应用到二维上,得到二维截面某一点处存在直径 D 小于给定

值 D_0 的骨料概率为^[19]:

$$P(D < D_0) = p_k \left[1.065 \times \left(\frac{D_0}{D_{\max}} \right)^{1/2} - 0.053 \times \left(\frac{D_0}{D_{\max}} \right)^4 - 0.012 \times \left(\frac{D_0}{D_{\max}} \right)^6 - 0.0045 \times \left(\frac{D_0}{D_{\max}} \right)^8 + 0.0025 \times \left(\frac{D_0}{D_{\max}} \right)^{10} \right]。 \quad (13)$$

式中: p_k 为混凝土中总骨料所占的体积率。

应用 MCM 随机分布,产生骨料、投放骨料的程序框图如图 1 所示。

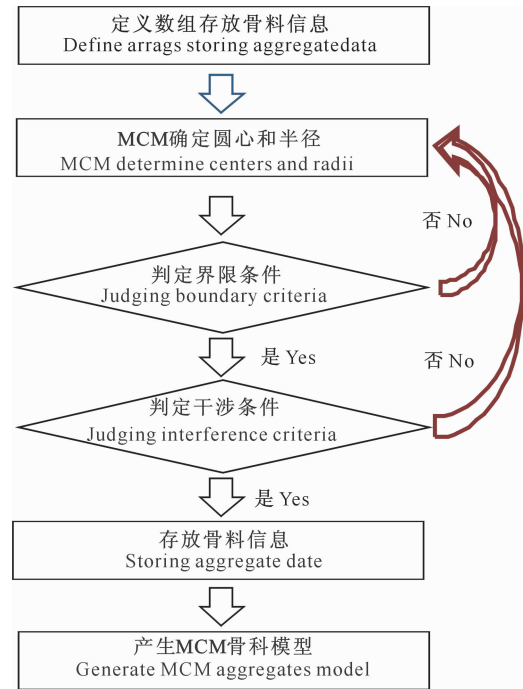


图 1 MCM 骨料模型程序框图

Fig. 1 MCM aggregates model simulation

3 结果与分析

沿某一方向施加以线性氯离子浓度为载荷的边界条件,利用热传导有限元分析得到各单元的氯离子通量值,经过积分计算该方向上的氯离子通量均值,最后得到氯离子通量均值与含量梯度的比值即为氯离子扩散系数值。

3.1 基于三相复合胞体的氯离子扩散系数的计算

选用三相复合胞体模型计算氯离子扩散系数的过程中,首先统计得到胞体范围内各单元某一方向的氯离子通量 J_i ,即通过单位体积的氯离子质量或物质的量,进而得到氯离子通量均值 $\bar{J}$:

$$\bar{J} = \frac{1}{V} \iiint_V J_i dV。 \quad (14)$$

式中: V 为三相胞体体积。

氯离子的扩散系数(D)可由下式计算:

$$D=-\frac{2r_c}{C_{\max}-C_{\min}}\bar{J}。$$

(15)

式中: r_c 为模型外圆半径, $C_{\max}$ 为边界最大浓度值, $C_{\min}$ 为边界最小浓度值。

为验证模型的有效性,采用 Yang 等^[20] 的试验背景进行数值模拟。Yang 等^[20] 试验中的骨料直径为 0.15~9.5 mm,骨料体积率分别取 0,10%,20%,30%和 40% 5 组变化值进行试验,采用 I 型波特兰水泥,水灰比为 0.4,制作直径 100 mm,高 200 mm 的柱体试件,养护 12 个月后截取芯部直径 50 mm,高 100 mm 的部分进行测试。试验过程执行美国材料实验学会标准(American Society of Testing Materials,ASTM)^[21],用稳态迁移法测量氯离子扩散系数,试验得到氯离子扩散系数与骨料体积率的关系见表 1。

表 1 Yang 等^[20] 试验得到的氯离子扩散系数

Table 1 Chloride diffusion coefficient from Yang et al^[20]

砂浆种类编号 Mortar species number	骨料体积率/% Aggregates volume ratio	氯离子扩散系数/ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) Chloride diffusion coefficient
M0	0	2.030
M1	10	1.807
M2	20	1.649
M3	30	1.519
M4	40	1.336

模拟计算前,需已知以下参数:

(1)骨料体积率。

(2)骨料扩散系数。由于与基体和过渡区相比骨料的渗透性极小,所以骨料的扩散系数可取趋于 0 的常数,考虑到混凝土基体和界面过渡区扩散系数的数量级基本在 $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,因此取骨料扩散系数为计算软件所允许的最小值即 $1.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{s}$ 来考虑骨料极低的扩散系数值。

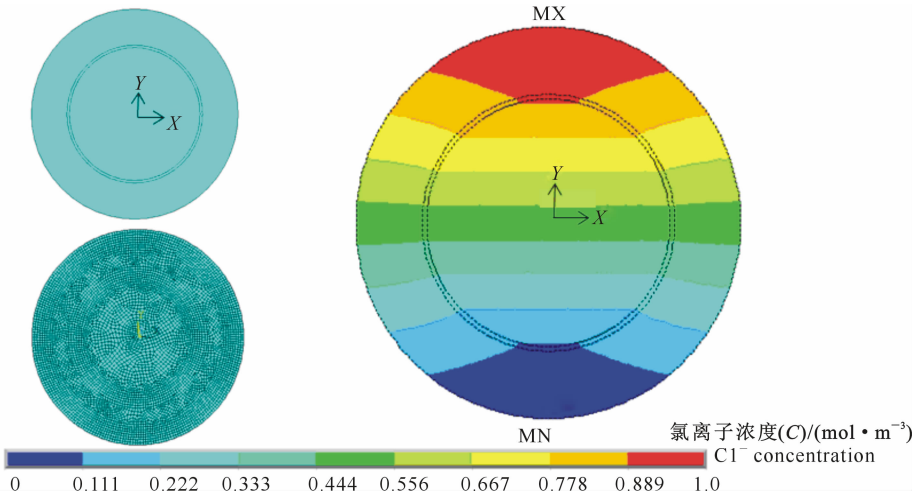
(3)混凝土基体体积率。可根据式(10)计算,而基体扩散系数 D_{cem} 的确定较为困难,因而根据试验数据选择无骨料时的扩散系数试验值作为模拟用值,即 $D_{\text{cem}}=2.030 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

(4)过渡区厚度。一般选择较为广泛认可的 0.03 mm。

(5)过渡区的扩散系数。从试验中不能直接得到,因而本研究选择骨料体积率为 40% 时的试验数据反向推出过渡区扩散系数,该值为 $D_{\text{ITZ}}=18.96 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

利用三相胞体模型计算时的模型图、网格划分及氯离子扩散结果见图 2。

由于骨料体积率为 0 和 40% 的数据已当作已知数据用于数值计算,故仅对其他 3 组试验情况进行对照模拟,相关参数值及计算结果见表 2,试验与模拟结果对比见图 3。由图 3 可知,胞体模型的模拟效果较好,扩散系数计算值的数量级均为 10^{-12} ,在骨料体积率为 10%,20%和 30%时,模拟结果与试验结果的相对误差分别为 4.16%,6.75%和 6.94%。



MX、MN 分别为氯离子浓度最高值和最低值;X、Y 为模型坐标系坐标轴
MX and MN denote the maximum value of concentration and minimum value of concentration, respectively.
X and Y are the coordinate axis of the modeling coordinate system.

图 2 三相胞体混凝土模型、网格划分和氯离子扩散浓度分布

Fig. 2 Concrete model,mesh partition and Cl⁻ concentration distribution of three-phase composite model

表 2 基于三相胞体模型的计算参数及模拟计算结果

Table 2 Calculated parameters and results of three-phase composite model

骨料体积率/% Aggregates volume ratio	N_a	A_{ITZ}	$D/(\times 10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	相对误差/% Relative error
0	—	—	2.030	—
10	0.406 0	0.002 80	1.732	4.16
20	0.812 1	0.008 95	1.538	6.75
30	1.218 1	0.018 50	1.414	6.94
40	1.624 1	0.031 47	1.336	—

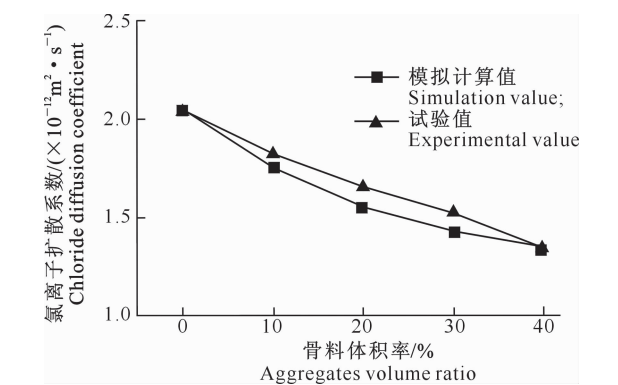


图 3 三相胞体模型模拟氯离子扩散系数与试验结果的比较

Fig. 3 Comparison between experimental and calculation results by composite model

3.2 基于随机骨料模型的氯离子扩散系数的计算

同样采用 Yang 等^[20]的试验背景进行数值模拟,骨料直径 0.15~9.5 mm,骨料体积率见表 1 中的 5 组值。与三相胞体模型计算类似,基体的扩散系数同样取为 $D_{\text{cem}}=2.030 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,过渡区厚度取为 0.03 mm,选择骨料体积率为 40%时的试验数据反向推出过渡区的扩散系数为 $D_{\text{ITZ}}=46.95 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

与三相胞体模型计算扩散系数的方法相同,但浓度边界条件为下表面最大值、上表面最小值,由式 (15)得计算随机骨料模型的扩散系数公式:

$$D=\frac{b}{C_{\max }-C_{\min }} \bar{J}。$$

(16)

式中: b 为混凝土模型边长。

利用随机骨料模型计算氯离子扩散系数的模型

表 3 基于随机骨料模型的计算参数及计算结果

Table 3 Calculated parameters and results of random aggregates model

骨料体积率/% Aggregates volume ratio	平均通量($\bar{J}$)/ ($\times 10^{-11} \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Mean flux	模型边长(b)/m Side length of model	$D/(\times 10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	相对误差/% Relative error
0	2.030 0	0.1	2.030 0	—
10	1.831 5	0.1	1.831 5	1.36
20	1.654 0	0.1	1.654 0	0.30
30	1.492 4	0.1	1.492 4	1.75
40	1.336 0	0.1	1.336 0	—

与网格划分见图 4,骨料直径分别选择 9.5,6.0 和 2.0 mm 的 3 种尺寸进行建模,在最大浓度为 1 mol/m³、最小浓度为 0 的边界条件下,图 5 和图 6 给出了氯离子的扩散结果和氯离子通量的矢量图。

相关参数值及计算结果见表 3,氯离子扩散系数计算与试验结果的对比见图 7。表 3 和图 7 结果表明,基于 MCM 随机骨料模型的计算结果十分理想,精度极高,效果好于三相胞体模型的计算结果,在骨料体积率为 10%,20%和 30%时,相对误差分别仅为 1.36%,0.30%和 1.75%。

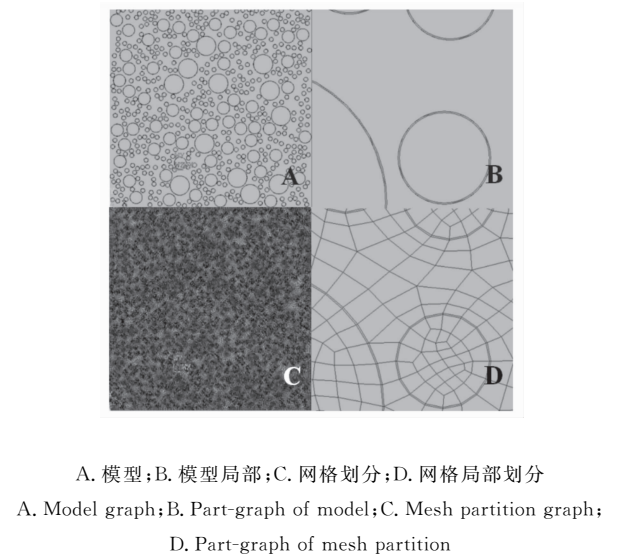
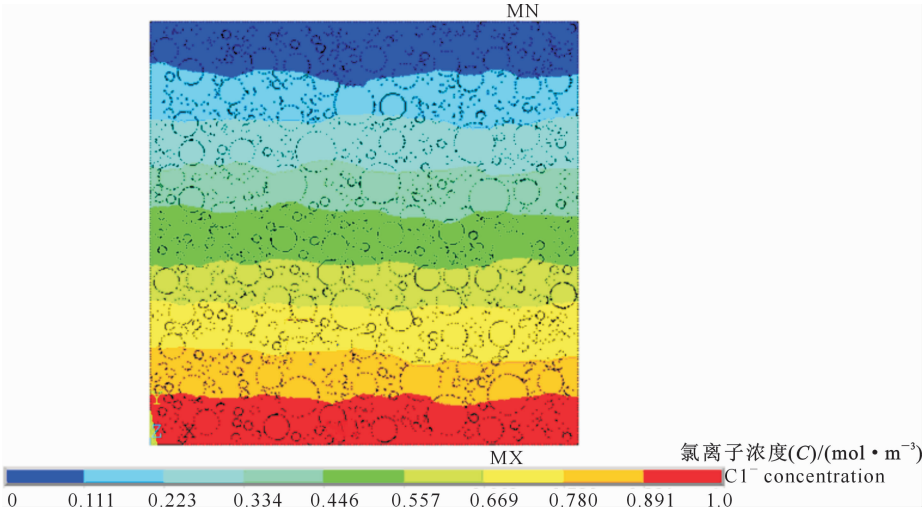


图 4 随机骨料模型与网格划分

Fig. 4 Concrete model and mesh partition of random aggregates model



MX、MN 分别为氯离子浓度最高值和最低值

MX and MN denote the maximum value of concentration and minimum value of concentration, respectively

图 5 基于随机骨料模型的氯离子扩散浓度的分布

Fig. 5 Cl^- concentration distribution of random aggregates model

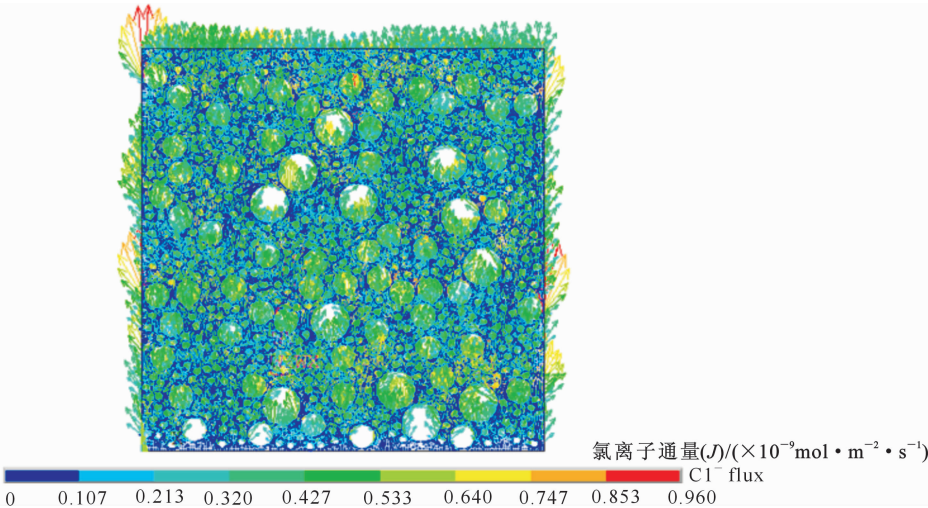


图 6 基于随机骨料模型的氯离子扩散通量的矢量

Fig. 6 Chloride diffusion flux of random aggregates model

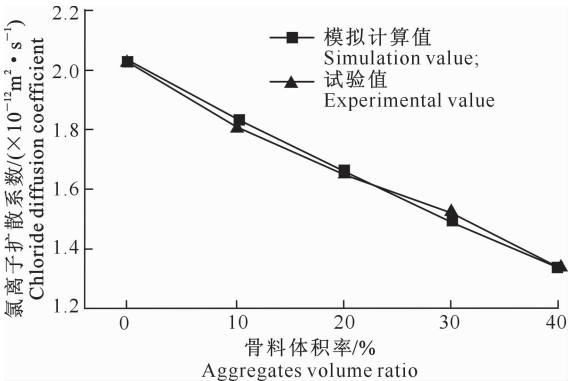


图 7 基于随机骨料模型的氯离子扩散系数计算值与试验结果的比较

Fig. 7 Comparison between experimental and calculation results by random aggregates model

4 结 论

本研究采用 MCM 随机骨料模型对混凝土的抗侵蚀性能进行研究,同时采用三相胞体模型为参照,对氯离子的扩散系数进行了较为详尽的计算研究。本研究采用反演法确定计算参数,即在骨料体积率、界面过渡区厚度已知条件下,通过已知的试验数据来反演得到界面过渡区的扩散系数 D_{ITZ} ,进而模拟计算其他试验组的扩散系数并比较结果。关于混凝土骨料品种、强度对结果的影响,可通过骨料的扩散系数取值予以考虑,目前一般认为骨料的扩散系数可忽略不计,因而本研究取计算软件所允许的最小值 $1.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{s}$,水胶比对结果的影响可通过混

凝土三相组成中的基体部分扩散系数 D_{cem} 来考虑,可预先从反演试验中获得。

(1)三相胞体和随机骨料2种模型都是可行的混凝土建模方法,基于MCM生成随机骨料能建立更符合实际情况的带界面过渡区的多骨料混凝土计算模型,并可用有限元法进行混凝土中氯离子扩散数值计算研究。

(2)氯离子扩散系数计算表明,三相胞体和随机骨料2种模型的数值计算结果与试验结果一致性良好,但以随机骨料模型的计算结果更为准确,3组模拟结果的相对误差仅为1.36%,0.30%和1.75%。

随着数值计算软硬件条件的不断提高,随机骨料模型的广泛应用已成为可能,模型高仿真性与计算结果高准确性将使得该模型在未来有更好的应用,而混凝土耐久性能数值研究也将得到更好的发展。

参考文献

- [1] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性[M].2版.北京:科学出版社,2014.
Jin W L,Zhao Y X. Durability of concrete structures [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2014.
- [2] 吉林,缪昌文,孙伟.结构混凝土耐久性及其提升技术[M].北京:人民交通出版社,2011.
Ji L,Miao C W,Sun W. Structure durability of concrete and improve technology [M]. Beijing: China Communication Press, 2011.
- [3] 金伟良,吕清芳,赵羽习,等.混凝土结构耐久性设计与寿命预测研究进展[J].建筑结构学报,2007,28(1):7-13.
Jin W L,Lu Q F,Zhao Y X,et al. Research progress on the durability design and life prediction of concrete structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(1): 7-13.
- [4] 余红发,孙伟.混凝土氯离子扩散理论模型[J].东南大学学报(自然科学版),2006,36(S2):68-76.
Yu H F,Su W. Model research on chlorine ion diffusion in concretes [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(S2): 68-76.
- [5] 于磊.冲刷与荷载作用下纳米混凝土内氯离子扩散特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
Yu L. Chloride diffusion in nano-concrete under the effects of scouring and loading [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [6] 赵尚传,贡金鑫,水金锋.弯曲荷载作用下水位变动区域混凝土中氯离子扩散规律试验[J].中国公路学报,2007,20(4):76-82.
Zhao S C,Gong J X,Shui J F. Test of chloride diffusion rules in concrete at tidal zone under flexural load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 76-82.
- [7] 彭建新,王华,张建仁,等.氯盐侵蚀下钢筋混凝土氯离子扩

散系数试验及其概率分析[J].中国公路学报,2014,27(6):77-83.

Peng J X,Wang H,Zhang J R,et al. Experimental study of chloride ion diffusion coefficient in concrete and probabilistic analysis of its influence on deterioration performance of RC structures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(6): 77-83.

- [8] 冯仲伟,谢永江,朱长华,等.混凝土电通量和氯离子扩散系数的若干问题研究[J].混凝土,2007(10):7-11.
Feng Z W,Xie Y J,Zhu C H,et al. Research on the issues about rapid chloride permeability test results and chloride diffusion coefficient of concrete [J]. Concrete, 2007(10): 7-11.
- [9] 庞超明,高美蓉,徐剑,等.试验方法及碳化对混凝土氯离子扩散系数的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2011,41(6):1313-1318.
Pang C M,Gao M R,Xu J,et al. Influence of test methods and carbonation on chloride ion diffusion coefficient of concrete [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(6): 1313-1318.
- [10] Li H,Xiao H G,Guan X C,et al. Chloride diffusion in concrete containing nano-TiO₂ under coupled effect of scouring [J]. Composites: Part B, 2014, 56: 698-704.
- [11] Skarzynski L,Nitka M,Tejchman J. Modelling of concrete fracture at aggregate level using FEM and DEM based on X-ray μ CT images of internal structure [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 147: 13-35.
- [12] Xiao J Z,Ying J W,Shen L M. FEM simulation of chloride diffusion in modeled recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 29: 12-23.
- [13] 徐伟芳,黄西成,郝志明,等.数值混凝土建模研究[J].固体力学学报,2013,33(S):253-261.
Xu W F,Huang X C,Hao Z M,et al. The study of the numerical concrete model [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, 33(S): 253-261.
- [14] 郑山锁,杨威,秦卿,等.基于材料劣化的既有混凝土构件数值建模方法研究[J].工业建筑,2015,45(1):100-105.
Zheng S S,Yang W,Qin Q,et al. The method of numerical modeling for existing RC components based on material degradation [J]. Industrial Construction, 2015, 45(1): 100-105.
- [15] 张凤国,刘军,梁龙河,等.数值建模时骨料对混凝土侵蚀及毁伤问题的影响[J].爆炸与冲击,2013,33(2):217-220.
Zhang F G,Liu J,Liang L H,et al. Influence of aggregate on penetration process of concrete target when numerical modeling [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(2): 217-220.
- [16] Moaveni S.有限元分析:ANSYS理论与应用[M].4版.李继荣,译.北京:电子工业出版社,2015.
Moaveni S. Finite element analysis: theory and application with ANSYS [M]. 4th ed. Li J R, translates. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [17] Zheng J J,Zhou X Z. Three-phase composite sphere model for the prediction of chloride diffusivity of concrete [J]. J Mater Civ Eng, 2008, 20(3): 205-211.

(下转第234页)

[12] 李士勇. 模糊控制 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.
Li S Y. Fuzzy control [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002.

[13] 赵志峰, 徐卫亚. 基于突变理论的边坡安全稳定性综合评价 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊): 2707-2712.
Zhao Z F, Xu W Y. Comprehensive assessment of slope safety and stability based on catastrophe theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Suppl.): 2707-2712.

[14] 刘红军, 赵兰霞. 土木工程地质 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 141-149.
Liu H J, Zhao L X. Civil engineering geological [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009: 141-149.

[15] 赵兰浩, 侯世超, 毛 佳. 库区滑坡涌浪数值模拟方法研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 81-85.
Zhao L H, Hou S C, Mao J. Review of numerical simulation of landslides and surges in reservoir districts [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 81-85.

[16] 罗爱忠, 邵生俊. 基于单元安全的黄土边坡动力稳定性分析 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(8): 229-234.
Luo A Z, Shao S J. Dynamic stability analysis of loess slope based on the zone safety degree [J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed), 2011, 39(8): 229-234.

[17] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2002.
Chen S Y. Fuzzy identification theory and application of complex water resources system optimization [M]. Changchun: Jilin University Press, 2002.

[18] 李继清, 张玉山, 纪昌明, 等. 突变理论在长江流域洪灾综合风险社会评价中的应用 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(4): 26-30.
Li J Q, Zhang Y S, Ji C M, et al. Application of catastrophe theory to social assessment of integrated flood disaster risks in Yangtze River [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(4): 26-30.

[19] 吴中如, 朱伯芳. 三峡水工建筑物安全监控与反馈设计 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
Wu Z R, Zhu B F. Safety monitoring and feedback design of hydraulic structure in Three George Project [M]. Beijing: China Water Power Press, 1999.

[20] 杨 杰, 陈平志, 伍美华, 等. 碧口水电厂大坝安全监测资料分析报告 [R]. 西安: 西安理工大学, 2007.
Yang J, Chen P Z, Wu M H, et al. Bikou dam safety monitoring data analysis report [R]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.

(上接第 227 页)

[18] Lu B L, Torquato S. Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle system [J]. Physical Review A, 1992, 45(8): 5530-5544.

[19] Bazant Z P, Tabbara M R, Kazemi M T, et al. Random particle models for fracture of aggregate or fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116(8): 1686-1705.

[20] Yang C C, Su J K. Approximate migration coefficient of interfacial transition zone and the effect of aggregate content on the migration coefficient of mortar [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(10): 1559-1565.

[21] ASTM C1202—2005 Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration [S]. USA: American Society of Testing Materials, 2005.