

文章编号: 1000-4750(2014)09-0166-08

基于 FVM 数值分析的海工混凝土结构 耐久可靠度 Monte Carlo 模拟

周新刚¹, 夏 辉¹, 李克非²

(1. 烟台大学土木学院, 烟台 264005; 2. 清华大学土木系, 北京 100084)

摘 要: 为研究海工混凝土结构耐久性设计及寿命预测的可靠度方法, 分析了耐久性设计与寿命预测的半理论、半经验解析模型方法, 讨论了截面形状等条件对氯离子扩散传输的影响。该文研究应用有限体积法(FVM)分析求解混凝土中氯离子含量和蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟求解耐久失效概率, 分析海工混凝土结构耐久可靠度。这种方法可简称 FVM-MC 方法。在 FVM-MC 方法中, 首先采用 FVM 方法求解混凝土中的氯离子含量, 然后采用 Monte Carlo 方法对失效概率进行模拟求解。验证分析表明, FVM-MC 方法分析模拟精度高, 是海工混凝土结构可靠度分析的一种可靠方法。计算结果表明, 截面形状等对混凝土结构的耐久可靠度具有显著的影响, 采用 Fick 第二定律解析解的半理论、半经验模型, 由于没有考虑截面形状效应, 增加了矩形截面构件的耐久失效风险; 圆形截面具有近似一维的扩散传输特点, 在条件相同情况下, 其构件耐久可靠度显著地高于方形或矩形截面的构件。

关键词: 海工混凝土结构; 耐久可靠度; 失效概率; FVM 方法; Monte Carlo 模拟; FVM-MC 方法

中图分类号: TU375

文献标志码: A

doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.04.0306

FVM NUMERICAL ANALYSIS BASED ON MONTE CARLO SIMULATION FOR DURABILITY AND RELIABILITY OF MARINE CONCRETE STRUCTURES

ZHOU Xin-gang¹, XIA Hui¹, LI Ke-fei²

(1. School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to study the reliability method for durability design and service life prediction of marine concrete structures, a semi empirical and semi theoretical analytical model for durability design and service life prediction of marine concrete structures is analyzed, and the influence of geometric shape and section on the diffusion transportation of chloride ions in concrete is discussed. A new approach to durability reliability analysis is proposed in this paper. The method is called the FVM-MC simulation method. The principle of the method is to first calculate the chloride ion content in concrete structural members using FVM, then analyze the durability failure probability using a Monte Carlo simulation. Verification shows that the FVM-MC method is accurate and feasible, and it is a reliable method for conducting durability reliability analysis of marine concrete structures. Simulations show that geometric shape and section have significant influences on the durability and reliability of concrete structures. The risk of durability failure may be increased in concrete structural members with rectangular sections designed by the analytical Fick's 2nd law model, because the impact of geometric shape and section has been neglected. Within circular sections, the diffusion transportation of chloride ions is similar to one dimensional transportation. Members with circular sections are conducive to durability.

收稿日期: 2013-04-04; 修改日期: 2014-04-08

基金项目: 国家科技支撑计划课题-跨海集群工程混凝土结构 120 年使用寿命关键技术项目(2011BAG07B04)

通讯作者: 周新刚(1963-), 男, 山东人, 教授, 博士, 从事混凝土结构耐久性研究(E-mail: ytuzhou@126.com).

作者简介: 夏 辉(1986-), 男, 山东人, 硕士生, 从事混凝土结构耐久性研究(E-mail: 626550622@qq.com);

李克非(1972-), 男, 陕西人, 教授, 博士, 所长, 从事混凝土结构耐久性研究(E-mail: likefei@tsinghua.edu.cn).

Key words: marine concrete structures; durability reliability; failure probability; FVM method; Monte Carlo simulation; FVM-MC method

为保证和提高混凝土结构,特别是跨海大桥、隧道等重大基础设施工程混凝土结构的使用寿命,近10年来,受氯离子侵蚀的混凝土结构耐久性研究有了重大进展^[1-4]。我国混凝土结构设计规范中,主要通过环境分类、最小保护层厚度要求、最低混凝土强度要求、材料及施工要求等措施,对混凝土结构耐久性进行定性设计。经过大量的研究,耐久性设计与寿命预测的定量分析方法得到了很大发展^[4-12]。定量设计方法在欧盟规范中得到了充分的体现。但是,受混凝土组成材料特性、环境条件、施工及养护条件的显著影响,定量分析模型中的参数具有较大的不确定性和随机性^[6-7]。这种不确定性和随机性不仅给定量设计分析带来了困难,往往也会给工程带来风险。为解决定量设计中参数和模型的不确定性和随机性带来的问题,研究和基于耐久极限状态的可靠度设计方法非常重要^[13-21]。

根据海工混凝土结构耐久极限状态方程,在可靠度计算分析中,首先应根据氯离子传输模型,计算混凝土中氯离子浓度及其变化。目前规范标准中所采用的计算模型一般都采用 Fick 第二定律的解析模型^[4-12]。该模型的传输机理是扩散理论,其解析解是扩散传输偏微分方程在半无限空间体上的解析解。但理论分析和实际工程调查都表明^[22-32],这种简化的计算模型有一定的局限性,对于梁、柱等具有特定截面尺寸的构件,解析模型得到的计算结果会有较大的偏差。为解决一维解析解中的问题,二维数值分析方法得到了重视和发展^[20, 25, 28, 29]。对于梁、柱等二维截面,其扩散传输的偏微分方程有很多解法,如有限差分法、有限元法、边界元法^[18]、神经网络法^[19]等。目前一般采用有限差分法和有限元法^[9-12, 24]分析混凝土中氯离子含量。有限体积法(FVM-Finite Volume Method)又称为控制体积法,是近几年发展起来的一种新的离散方法,具有效率高的特点,且在粗网格下也能满足准确的积分守恒,因此在流体力学领域得到了很好的发展和应用^[32-36]。本文用 FVM 法对混凝土中的氯离子含量进行数值模拟求解。

一维极限状态方程为显式,耐久失效概率的分析方法很多^[13-15, 17, 20, 23]。对于二维问题,极限状态方程为隐式,其失效概率需要应用数值方法进行模

拟。Monte Carlo 模拟是一种重要的结构失效概率数值模拟求解方法^[37-38]。本文在应用 FVM 法求解混凝土中氯离子浓度的基础上,采用 Monte Carlo 方法对耐久失效概率进行数值模拟分析,提出了一种新的混凝土结构耐久可靠度分析方法 FVM-MC 方法。

1 海工混凝土结构耐久可靠度分析

海工混凝土结构受到氯离子的侵蚀,随着时间的推移,其内部的氯离子会不断累积。当钢筋周围的氯离子含量累积达到临界氯离子浓度时,钢筋钝化膜会破坏,在氧气和水的作用下,钢筋会发生电化学反应而锈蚀。随着锈蚀的增加,钢筋的截面尺寸减小,锈蚀产物体积膨胀,使混凝土保护层产生顺筋裂缝,钢筋与混凝土之间的粘结力也会降低,结构的正常使用性能和安全性会降低。虽然钢筋脱钝开始锈蚀时,结构的性能还不会降低,但结构劣化的速度会加快。对于海工混凝土结构,后期的维修维护费用会显著增加,因此 Duracrete 及 Fib 等规范,一般把钢筋脱钝、开始锈蚀作为耐久极限状态^[6-12]。其极限状态方程为:

$$Z = g(x) = g(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = g(C_{cr}, C_{sa}, x, D_a, n, t) = C_{cr} - C(x, t) \quad (1)$$

极限状态方程中的六个基本变量($x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$)分别对应临界氯离子浓度 C_{cr} 、表面氯离子浓度 C_{sa} 、混凝土保护层厚度 x 、氯离子扩散系数 D_a 、氯离子扩散系数衰减系数 n 和设计使用寿命 t 。根据耐久极限状态的定义,当钢筋处的氯离子浓度达到临界氯离子浓度时所需要的时间即为混凝土结构的耐久使用寿命。由极限状态方程式(1),当 $g(x) > 0$, 处于可靠状态; 当 $g(x) = 0$, 达极限状态; 当 $g(x) < 0$, 处于耐久失效状态。因此,海工混凝土结构的耐久失效概率可表示为:

$$P_f = P\{g(x) \leq 0\} = \int_{g(x) \leq 0} f_X(x) dx \quad (2)$$

由于可靠概率与失效概率互补,由式(2)可知,海工混凝土结构的可靠度分析,实质就是求给定设计寿命 t 时,混凝土中钢筋脱钝、开始锈蚀的失效概率及其随时间的变化规律。首先要分析混凝土中钢筋周围的氯离子含量 $C(x, t)$ 随时间的变化规律。

根据扩散传输理论,混凝土中任意点、在任意时刻的氯离子浓度 $C(x,t)$ 可通过下列微分方程求解:

一维扩散传输:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial C^2}{\partial x^2} \quad (3)$$

二维扩散传输:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \left(\frac{\partial C^2}{\partial x^2} + \frac{\partial C^2}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

由于受到化学和物理结合作用等因素的影响,氯离子扩散系数 D_a 并非定值,而是随时间而衰减,其衰减规律为^[6-8]:

$$D_a(t) = D_{a\text{test}} \left(\frac{t_{\text{test}}}{t} \right)^n \quad (5)$$

式中: $D_a(t)$ 为随时间变化的表观氯离子扩散系数; $D_{a\text{test}}$ 为实测氯离子扩散系数; t_{test} 为实测混凝土的龄期; t 为混凝土的龄期; n 为氯离子扩散系数的衰减系数。因此,海工混凝土结构耐久可靠度分析的基本变量为临界氯离子浓度 C_{cr} 、表面氯离子浓度 C_{sa} 、混凝土保护层厚度 x 、氯离子扩散系数 D_a 、氯离子扩散系数衰减系数 n 和设计使用寿命 t 。

为简化分析,目前国内外混凝土结构耐久性设计规范中^[6-8],一般取一维偏微分方程在半无限空间体上的解析解,作为分析混凝土中氯离子含量的定量分析模型,即 Fick 第二定律的解析模型:

$$C(x,t) = C_{sa} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] \quad (6)$$

式中, $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为误差函数。将式(6)代入式(1)中,可以得到功能函数的显式表达。只要知道方程中基本变量的分布规律,就可根据一些传统的可靠度分析方法,如 FOSM、AFOSM 等^[37-38],分析海工混凝土结构的耐久可靠度。

实际混凝土结构构件一般为板式、矩形或圆形截面,其边界条件及初始条件与一维半无限空间体有很大差别。对氯离子在混凝土中的扩散传输而言,由于截面形状及边界条件的影响,采用 Fick 第二定律的解析模型,会对混凝土中氯离子含量的分析带来显著的影响,会低估混凝土中的氯离子含量,高估混凝土结构的耐久可靠度。研究表明,氯离子在混凝土中二维扩散传输的速度明显高于一维^[28],由于二维传输的影响,混凝土边角位置的氯

离子会显著增加,从而降低混凝土结构的耐久寿命^[29]。工程调查资料也表明,位于边角位置的钢筋会提前锈蚀,导致边角位置首先出现顺筋裂缝^[31]。而且几何形状及边角效应与混凝土组成材料及暴露条件有关,在不同的暴露环境中,具有不同的影响程度。因此,对于海工混凝土结构,特别是跨海大桥、隧道等重大工程建设中,根据构件截面的实际形状及暴露的边界条件,准确分析和预测混凝土中氯离子含量及其随时间的变化规律,结合可靠度理论进行耐久性设计及工程决策,对确保工程全寿命周期的安全性、适用性与经济性十分重要。

2 混凝土中氯离子含量的 FVM 数值求解

对于板式混凝土构件,其截面可简化为一维问题,而对于梁、柱等矩形和圆形截面,其截面可简化为二维问题。根据 FVM 的基本原理^[34-36],根据图 1,氯离子在混凝土中传输,其在控制体积上应保持质量平衡。根据式(3)和式(4)所表达的一维和二维偏微分方程,在控制体积上积分,对于一维、二维矩形及圆形截面可得到基本的平衡条件为:

一维:

$$\int_{\Delta V} \left[\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial C}{\partial t} dt \right] dV = \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(DA \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i+1/2} - \left(DA \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i-1/2} \right] dt \quad (7)$$

二维:

$$\int_{\Delta V} \left[\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial C}{\partial t} dt \right] dV = D \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(A \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i+1/2,j} - \left(A \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i-1/2,j} \right] dt + D \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(A \frac{\partial C}{\partial y} \right)_{i,j+1/2} - \left(A \frac{\partial C}{\partial y} \right)_{i,j-1/2} \right] dt \quad (8)$$

式中: ΔV 为控制体积; A 为面积; Δt 为时间步长。由式(7)和式(8),可将一维板、二维矩形梁、柱及圆形柱的偏微分方程离散为如下形式:

一维板式截面:

$$C_i^{t+\Delta t} = \frac{D\Delta t}{(\Delta x)^2} (C_{i-1}^t + C_{i+1}^t) + \left[1 - 2 \frac{D\Delta t}{(\Delta x)^2} \right] C_i^t \quad (9)$$

二维矩形截面:

$$C_{i,j}^{t+1} = \frac{D\Delta t}{\Delta h^2}(C_{i-1,j}^t + C_{i+1,j}^t + C_{i,j+1}^t + C_{i,j-1}^t) + \left(1 - \frac{4D\Delta t}{\Delta h^2}\right)C_{i,j}^t \quad (10)$$

二维圆形截面:

$$C_r^{t+1} = \left(\frac{D\Delta t}{r \cdot \Delta r^2} + \frac{D\Delta t}{\Delta r^2}\right)C_{r+1}^t + \left(1 - \frac{D\Delta t}{r \cdot \Delta r^2} - \frac{2D\Delta t}{\Delta r^2}\right)C_r^t + \frac{D\Delta t}{\Delta r^2}C_{r-1}^t \quad (11)$$

式中: r 为从圆心到控制网格中心的距离; Δr 为控制网格的厚度。根据上述离散方程以及边界和初始条件, 可以编写程序求解混凝土中的氯离子浓度 $C(x,t)$ 。

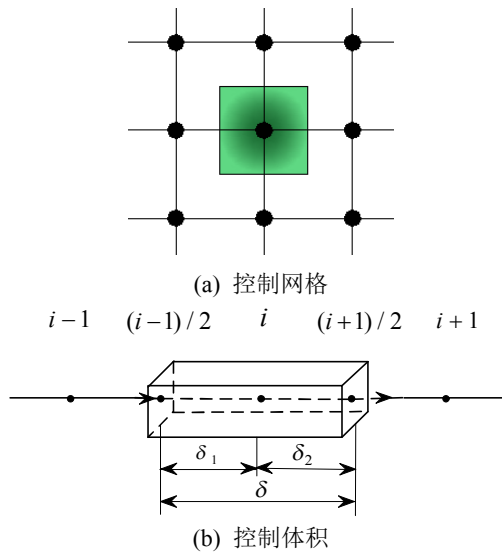


图1 控制网格及控制体积
Fig.1 Control grid and volume

为验证 FVM 方法及所编制程序的正确性, 假设氯离子的扩散系数为 $4 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$, 表面氯离子浓度为 3.9%(占胶凝材料的百分比), 计算混凝土中氯离子随时间的变化规律。图 2 为一维问题 60mm 深度处氯离子浓度的计算结果。从图 2 可见, 在一维情况下, FVM 方法计算结果与解析解吻合良好。

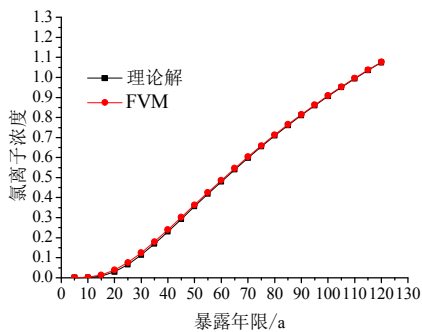


图2 一维理论解和 FVM 解的比较
Fig.2 Comparison of analytic solution and FVM

对于矩形截面角部的钢筋, 钢筋处的氯离子浓度也可以用解析式求出^[30]。文献[29]研究了掺粉煤灰混凝土的氯离子扩散。将试件暴露于盐溶液中, 测量混凝土中氯离子含量, 然后推算一维和二维的扩散系数。表 1 为根据实测的氯离子扩散系数, 计算暴露 10 年时离表面 20mm 和 30mm 深度处的氯离子浓度, 表面氯离子浓度为 4%。从表 1 可见, 对于二维问题, FVM 法也有很好的模拟分析精度。

表 1 实测值与 FVM 法计算结果

Table 1 Test results for FVM method and analytical solution

扩散系数/ ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	氯离子浓度/(%)凝胶材料质量			
	FVM		实测值	
	20mm	30mm	20mm	30mm
1.70	3.1710	2.3801	3.1585	2.3594
0.88	2.5575	1.4899	2.5404	1.4584
1.80	3.2122	2.4491	3.2000	2.4288
2.40	3.3933	2.7667	3.3829	2.7486
1.30	2.9527	2.0340	2.9387	2.0107
1.10	2.7949	1.8041	2.7797	1.7782

3 混凝土耐久可靠度的 Monte Carlo 求解

根据 Monte Carlo 可靠度模拟分析的基本原理^[34-35], 假设功能函数中的基本变量相互独立, 则式(2)可写为:

$$P_f = P\{g(x) = C_{cr} - C(x,t) \leq 0\} = \int_{g(x) \leq 0} f_X(x) dx = \int \dots \int_{g(x) \leq 0} f_{X_1}(x_1) f_{X_2}(x_2) \dots f_{X_n}(x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n = \int \dots \int_{R^n} I_F(x) f_y(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n = E[I_F(x)] \quad (12)$$

以随机变量的联合概率密度 $f_X(x)$ 抽取 n 个样本 $X_i (i=1, 2, \dots, N)$, 落入失效域 F 内样本点个数 N_f 与总样本点的个数 N 之比即为失效概率的估计 \hat{P}_f , 即:

$$\hat{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_F(X_i) = \frac{N_f}{N} \quad (13)$$

失效概率估计值的方差估计为:

$$Var[\hat{P}_f] \approx \frac{1}{N-1} (\hat{P}_f - \hat{P}_f^2) \quad (14)$$

失效概率估计值的变异系数估计为:

$$Cov[\hat{P}_f] = \frac{\sqrt{Var[\hat{P}_f]}}{E[\hat{P}_f]} = \sqrt{\frac{1 - \hat{P}_f}{(N-1)\hat{P}_f}} \quad (15)$$

Monte Carlo 方法求解混凝土结构耐久可靠度的基本步骤为:

1) 在给定设计寿命 t 的情况下, 设计变量为 C_{cr} 、 C_{sa} 、 x 、 D_a 、 n 。根据统计分析, 可以确定五个基本变量的分布特征及分布参数^[36], 由随机样本产生的方法产生 N 组随机向量的样本。

2) 由式(9)~式(11)计算氯离子浓度 $C(x,t)$ 。将计算得到的 $C(x,t)$ 代入式(12)、式(13)中, 就可以求出 \hat{P}_f 。应用式(14)和式(15), 可求出失效概率估计值的方差及变异系数。

4 算例

为验证采用 FVM 求混凝土中氯离子浓度, 然后用 Monte Carlo 方法模拟求解海工混凝土结构耐久可靠度方法及编制程序的可靠性, 首先对一维问题进行计算验证。因为在一维情况下, 氯离子浓度可以由定量的解析模型求解, 耐久极限状态方程为显式, 因此, 耐久可靠度可根据 FOSM、AFOSM 等传统方法求解。再由本文介绍的 FVM-MC 方法求解, 比较其结果, 以判定分析 FVM-MC 方法及编制程序的可靠性。

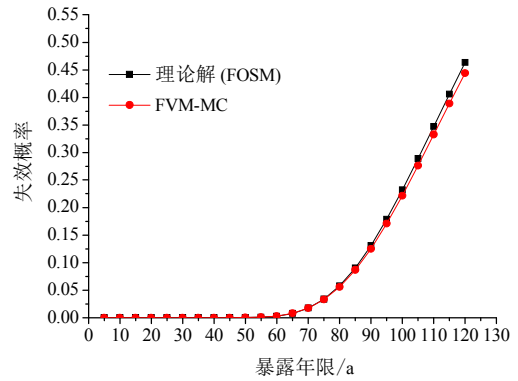
根据暴露实验的实验结果分析^[39], 采用粉煤灰掺和料、处于水下区的混凝土, 其氯离子浓度、临界氯离子浓度、氯离子扩散系数及保护层厚度等设计变量均符合标准正态分布, 其统计特征见表 2。由于在氯离子含量解析求解中, 难以考虑氯离子扩散系数的衰减, 在验证分析中假设氯离子扩散系数不随时间衰减, 即取 n 等于零; 保护层厚度的平均值分别取 60mm 和 70mm。

表 2 基本变量的统计特征
Table 2 Basic variable statistics

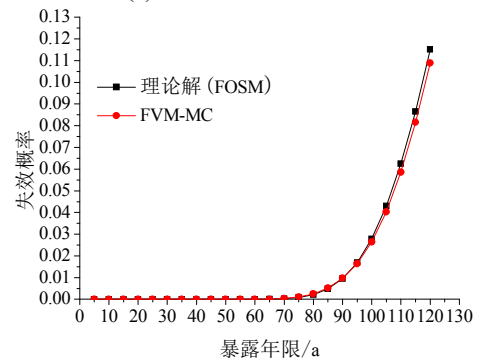
环 境 和 条 件	表面氯离子浓度/ (%)胶凝材料质量		临界氯离子浓度/ (%)占胶凝材料质量		扩散 系数/ (m ² /s)	保护层 厚度/ mm	
	平 均 值	标 准 差	平 均 值	标 准 差		平 均 值	标 准 差
水粉 下煤 区灰	3.90	0.45	1.10	0.1617	4×10^{-13}	8×10^{-14}	60(70)

图 3 给出了采用 FOSM 方法和 FVM-MC 计算的海工混凝土结构耐久失效概率随使用(暴露)年限变化规律。从图 3 所示分析结果可见, 在不同保护层厚度下, 两种计算方法所得的结果非常吻合, 说

明 FVM-MC 方法, 能很好地分析与预测海工混凝土结构的耐久可靠度。比较图 3(a)与图 3(b)可见, 在相同条件下, 增加混凝土保护层厚度, 可以显著地提高海工混凝土的使用寿命和耐久可靠度。在模拟计算条件下, 保护层厚度增加 10mm, 混凝土中钢筋由于氯离子侵蚀脱钝、开始锈蚀的时间能延长约 40 年。当钢筋脱钝、开始锈蚀后, 混凝土的耐久失效概率会快速增大。



(a) 保护层厚度 60mm



(b) 保护层厚度 70mm

图 3 不同保护层厚度情况下, 一维 FOSM 法和 FVM-MC 方法的模拟结果

Fig.3 Simulation results for FOSM method and FVM-MC method for different cover thicknesses

在二维扩散传输中, 混凝土中的氯离子浓度, 特别是边角位置的氯离子浓度会显著地高于一维传输的情况, 会使梁、柱等矩形截面的混凝土结构构件加速失效。假设表面氯离子浓度和临界氯离子浓度的统计特征同表 2, 正方形截面的边长为 400mm, 圆形截面的直径也为 400mm, 保护层厚度取 60mm。计算中考虑氯离子扩散系数的衰减系数服从正态分布, 取 $\mu_n = 0.6$, $\sigma_n = 0.104$, 氯离子扩散系数的平均值和标准差分别为 $3 \times 10^{-12} m^2/s$, 标准差为 $6 \times 10^{-13} m^2/s$ 。

图 4 给出了应用 FVM-MC 方法按一维和二维传输两种情况的计算结果。从图 4 可见, 在计算条

件下,按二维传输计算,其钢筋脱钝、开始锈蚀的时间是按一维传输计算的 50%左右;二维情况下,海工混凝土的失效风险大大增加,可靠度显著下降。分析表明,由于实际的混凝土结构构件具有一定的截面形状,氯离子在混凝土中扩散传输符合二维扩散传输的特点,采用 Fick 第二定律的解析模型,忽略了截面形状的影响,低估了混凝土中氯离子含量,高估了耐久可靠度,使结构的耐久性设计及寿命预测偏于不安全。而采用 FVM-MC 方法模拟分析耐久可靠度,可以真实地模拟氯离子在混凝土中的扩散传输,能求解任意截面形状和尺寸的海工混凝土结构的耐久可靠度,为海工混凝土结构的耐久性设计和寿命预测提供了有力工具。

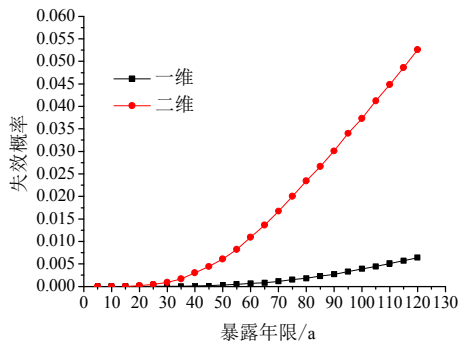


图4 海工混凝土耐久失效概率随时间的变化规律

Fig.4 Failure probability of marine concrete versus time

图5为方形截面与圆形截面耐久失效概率随时间的变化规律图。从图5可见,圆形与方形截面的形式不同,对氯离子的扩散传输影响很大。圆形截面有近似一维扩散传输的特点,在截面边长和直径相同的情况下,圆形截面的失效概率远小于方形或矩形截面,即在相同情况下,有较高的耐久可靠度。在海工混凝土结构中,柱一般可做成圆形截面,有助于提高其耐久性;梁等构件一般为矩形截面,在相同条件下,其耐久失效的风险较大,应在设计中考虑这一因素的影响。

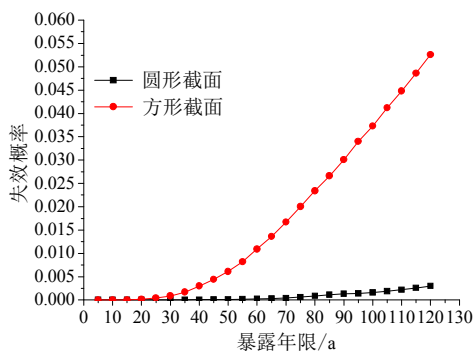


图5 方形截面与圆形截面比较

Fig.5 Comparison of circular section with rectangular section

图4和图5中计算的耐久可靠度考虑了氯离子扩散系数的衰减,比较图2、图3和图4、图5可见,考虑扩散系数的衰减,其耐久可靠度有很大提高。因此,在混凝土结构耐久性可靠度分析中,不仅要考虑截面形状的影响,而且要用数值分析方法,充分考虑扩散系数的衰减,即随暴露时间的增加,扩散系数的减小。

5 结论

耐久性设计基本变量的不确定性和随机性对海工混凝土结构的耐久性有显著影响。采用可靠度理论,充分考虑基本设计变量不确定性及随机性的影响,进行海工混凝土结构耐久性设计及寿命预测,对跨海大桥及隧道等重大土木工程建设具有重要意义。

本文研究的 FVM-MC 方法,以钢筋脱钝、开始锈蚀为耐久极限状态,采用 FVM 数值分析方法,求解具有任意截面形状的海工混凝土构件的氯离子含量及其随时间变化;采用 Monte Carlo 方法模拟求解失效概率。分析表明, FVM-MC 方法分析精度高,比 FOSM 等传统可靠度分析方法具有显著优点。是一种新的海工混凝土结构耐久可靠度数值分析方法。

研究表明,截面形状对混凝土结构的耐久可靠度有显著影响,氯离子在圆形截面中的传输,具有近似一维扩散传输的特点。对于具有一定截面形状的混凝土结构构件,氯离子在混凝土中的扩散是二维扩散传输,采用一维扩散传输的 Fick 第二定律解析模型分析计算混凝土中的氯离子含量,进行耐久可靠度分析,有很大的局限性。忽略了截面形状对扩散传输的影响,低估了氯离子浓度,高估了海工混凝土结构的耐久可靠度,会增加海工混凝土结构的失效风险。在其他条件相同的情况下,其耐久可靠度显著地高于方形或矩形截面。扩散系数的衰减对混凝土结构耐久可靠度也有重要影响,在设计及寿命预测中应予以充分考虑。

参考文献:

- [1] 孙伟. 现代混凝土材料与结构服役特性的研究进展[J]. 混凝土世界, 2009, 1(7): 21-30.
Sun Wei. Research progress of modern concrete material and service characteristics of structure [J]. China Concrete, 2009, 1(7): 21-30. (in Chinese)
- [2] 金贤玉, 顾祥林, 田野, 等. 混凝土结构服役寿命设计的探索与研究进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(11):

- 26—33.
Jin Xianyu, Gu Xianglin, Tian Ye, et al. Progress in research of concrete structures service life design [J]. Materials China, 2009, 28(11): 26—33. (in Chinese)
- [3] 金伟良, 吕清芳, 赵羽习, 等. 混凝土结构耐久性设计方法与寿命预测研究进展[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(1): 7—13.
Jin Weiliang, Lü Qingfang, Zhao Yuxi, et al. Research progress on the durability design and life prediction of concrete structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(1): 7—13. (in Chinese)
- [4] 陈艾荣. 基于给定结构寿命的桥梁设计过程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 9—78.
Chen Airong. Design progress of bridges based on given structural life [M]. Beijing: China Communications Press, 2009: 9—78. (in Chinese)
- [5] GB/T50476, 混凝土结构耐久性设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
GB/T50476, Code for durability design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [6] The European Union-Brite EuRam III-BE95-1347/R15. DuraCrete: General guidelines for durability design and redesign-probabilistic performance based durability design of concrete structure [R]. Aachen: The European Union-Brite EuRam, 2000: 5—56.
- [7] Fib Bulletin No. 34, Model code for service life design [S]. Lausanne: Fib, 2006.
- [8] CCES01-2004(2005 修订版), 混凝土结构耐久性设计施工指南[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 43—52.
CCES01-2004 (2005 revised edition), Guide to durability design and construction of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 43—52. (in Chinese)
- [9] Truc O. Prediction of chloride penetration into saturated concrete-multi-species approach [D]. Goteberg: Department of Building Materials, Chalmers University of Technology, Publication P-00: 4, 2000.
- [10] Truc O, Ollivier J P, Nilsson L O. Numerical simulation of multi-species transport through saturated concrete during migration test-MsDiffcode [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(10): 1581—1592.
- [11] Lindvall A. Probabilistic performance based service life design of concrete structures-environmental action and response [C]. Paris: Proceedings of 2nd International RILEM Workshop on Testing on Modeling in Chloride Ingress into Concrete, 2000: 277—289.
- [12] Nilsson L O, Pouslen E, Sandberg P, Sorensen H E, Klinghoffer O. HETEK, Chloride penetration into concrete, state-of-the-art, transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models [R]. Copenhagen: The Road Directorate, 1996.
- [13] 刘涛, 姚继涛, 牛荻涛. 混凝土结构耐久性的概率极限状态设计法[J]. 混凝土, 2008, 227(9): 16—24.
Liu Tao, Yao Jitao, Niu Ditao. Probability limit states method for durability design based on criterion of carbonation life [J]. Concrete, 2008, 227(9): 16—24. (in Chinese)
- [14] 王剑, 刘西拉. 对关系结构耐久性计算的两种思路的比较[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(3): 39—41.
Wang Jian, Liu Xila. Comparison of two alternatives for structural durability calculation [J]. Building Science Research of Sichuan, 2003, 29(3): 39—41. (in Chinese)
- [15] 马亚丽, 张爱林. 基于规定可靠指标的混凝土结构氯离子侵蚀耐久寿命预测[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2): 36—41.
Ma Yali, Zhang Ailin. Durability life prediction of concrete structures based on the regulated reliability index under chloride environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2): 36—41. (in Chinese)
- [16] 贡金鑫, 赵国藩. 国外结构可靠性理论的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 1—7.
Gong Jinxin, Zhao Guofan. Application and development of structural reliability theory abroad [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(2): 1—7. (in Chinese)
- [17] Fabrice Deby, Myriam Carcasses, Alain Sellier. Toward a probabilistic design of reinforced concrete durability: Application to a marine environment [J]. Materials and Structures, 2009, 42(10): 1379—1391.
- [18] Guo L, Chen T, Gao X W. Transient meshless boundary element method for prediction of chloride diffusion in concrete with time dependent nonlinear coefficients [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2012, 36(2): 104—111.
- [19] Peng Jun, Li Zonglin, Ma Baoguo. Neural network analysis of chloride diffusion in concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(4): 327—333.
- [20] Ane de Boer, Joost Gulikers. Effect of reinforcement geometry on the probability of corrosion initiation in reinforced concrete structures [J]. Structural Engineering International, 2009, 19(2): 198—202.
- [21] Zhang Jieying, Zoubir Lounis. Nonlinear relationships between parameters of simplified diffusion-based model for service life design of concrete structures exposed to chlorides [J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 31(8): 591—600.
- [22] Marchand J, Samson E. Predicting the service-life of concrete structures—Limitations of simplified models [J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 31(8): 515—521.
- [23] Deby F, Carcasses M, Sellier A. Probabilistic approach for durability design of reinforced concrete in marine environment [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(5): 466—471.
- [24] Tang Luping. Engineering expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in

- submerged marine concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(8/9): 1092—1097.
- [25] Irina Stipanovic Oslakovicm, Dubravka Bjegovic, Dunja Mikulic. Evaluation of service life design models on concrete structures exposed to marine environment [J]. *Materials and Structures*, 2010, 43(10): 1397—1412.
- [26] 王显利, 郑建军, 吴智敏, 孟宪强. 圆形截面混凝土中的自由氯离子含量分布规律[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2006, 22(6): 890—894.
Wang Xianli, Zheng Jianjun, Wu Zhimin, Meng Xianqiang. The distribution rules of free chloride concentration in circular section concrete elements [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2006, 22(6), 890—894. (in Chinese)
- [27] 王晓舟, 金伟良, 金立兵. 基于广义扩散方程海工混凝土结构耐久寿命概率评估方法[J]. *海洋工程*, 2009, 27(3): 85—90.
Wang Xiaozhou, Jin Weiliang, Jin Libing. A probabilistic approach of life prediction of marine concrete structures based on GDF [J]. *The Ocean Engineering*, 2009, 27(3): 85—90. (in Chinese)
- [28] 刘芳, 宋志刚, 潘仁良, 金伟良. 用 Fick 第二定律描述混凝土中氯离子浓度分布的适用性[J]. *混凝土与混凝土制品*, 2005, 32(4): 7—10.
Liu Fang, Song Zhigang, Pan Renliang, Jin Weiliang. The applicability study on the Fick's second law for calculation of chloride content in concrete [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2005, 32(4): 7—10. (in Chinese)
- [29] Zhang Yunsheng, Sun Wei, Chen Shudong, Guo Fei. Two and three dimensional chloride ingress into fly ash cement [J]. *Journal of Wuhan University of Technology Materials*, 2011, 26(5): 978—982.
- [30] Zhou Xingang, Zhao Fang. Influence of boundary and initial condition on durability of concrete structures exposed to chloride environment [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 166/167/168/169: 1946—1953.
- [31] 周新刚, 许超, 鲍海震, 等. 某钢筋混凝土密肋楼盖钢筋锈蚀分析[C]. 沈阳: 全国第七届高强与高性能混凝土学术会议论文集, 2010: 81—86.
Zhou Xingang, Xu Chao, Bao Haizhen, et al. Corrosion analysis of certain reinforced concrete ribbed floor [C]. Shenyang: Collected papers of 7th High Strength and High Properties Concrete Conference, 2010: 81—86. (in Chinese)
- [32] 夏辉, 周新刚, 李克非. 不同暴露条件下海工混凝土耐久性几何效应分析[J]. *工程力学*, 2013, 30(9): 227—233.
Xia Hui, Zhou Xingang, Li Kefei. Geometric effect analysis of concrete structures exposed to different marine conditions [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(9): 227—233. (in Chinese)
- [33] Zhou Xingang, Li Kefei, Chen Zhaoyuan. Modeling boundary and edge effect of chloride diffusion for durability design of concrete structures exposed in marine environment [J]. *Journal of Wuhan University of Technology Materials Science*, 2013, 28(6): 1112—1117.
- [34] Versteeg H K, Malalasekera W. *An Introduction to Computational fluid dynamics-the finite volume method* [M]. 2nd ed. Pearson Prentice Hall, 2007: 15—36.
- [35] 李人宪. *有限体积法基础*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 15—36.
Li Renxian. *Foundational of finite volume method* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 15—36. (in Chinese)
- [36] 周新刚, 李克非, 陈肇元. 氯离子在混凝土中扩散传输的有限体积法模拟分析[J]. *工程力学*, 2013, 30(7): 34—39.
Zhou Xingang, Li Kefei, Chen Zhaoyuan. Simulation analysis of chloride penetration in concrete with finite volume method [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(7): 34—39. (in Chinese)
- [37] 张明. *结构可靠度分析-方法与程序*[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 143—174.
Zhang Ming. *Structural reliability analysis-method and procedures* [M]. Beijing: Sciences Press, 2009: 143—174. (in Chinese)
- [38] 吕震宙, 宋述芳, 李洪双, 等. 结构机构可靠性及可靠性灵敏度分析[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 91—119.
Lü Zhenzhou, Song Shufang, Li Hongshuang, et al. *Reliability and reliability sensitivity analysis of structure* [M]. Beijing: Sciences Press, 2009: 91—119. (in Chinese)
- [39] 中交集团四航院, 清华大学. 基于可靠度的港珠澳大桥混凝土结构耐久性 120 年设计使用寿命耐久性设计技术研究[R]. 北京: 2009, 9.
China Communications Construction Company Tsinghua University. *Technical research of 120 Year's durability service life design of Hong Kong-Zhuhai-Macau bridge based on reliability* [R]. Beijing: 2009, 9. (in Chinese)