



海洋环境状态下受氯盐侵蚀钢筋混凝土 结构耐久性寿命预测

周 萌, 张振浩, 黄雨杭, 宁中伟

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 在海洋环境中, Cl^- 入侵造成的钢筋锈蚀是影响钢筋混凝土结构服役寿命的主要原因。因此, 提出合理描述 Cl^- 入侵的耐久性模型对于准确预测港口混凝土结构服役寿命至关重要。文章运用 MATLAB 软件对 Cl^- 在钢筋混凝土结构中的扩展过程进行仿真模拟, 将得到的数据进行 Gamma 过程建模, 提出一种 Cl^- 侵蚀条件下钢筋混凝土耐久性寿命预测的新方法。根据菲克第二定律, 得到混凝土的 Cl^- 扩散理论基准模型; 同时, 运用有限差分法和蒙特卡罗法得出多因素作用下结构钢筋表面 Cl^- 浓度数据和结构耐久性数据, 做出直方图, 与基于 Gamma 过程的耐久性寿命概率密度函数理论曲线进行对比分析, 证明新方法的可行性。结果表明: 理论曲线与直方图高度吻合, 表明了基于 Gamma 过程的氯盐侵蚀环境下钢筋混凝土结构耐久性模型的准确性和可靠性。本文成果可为确保港口混凝土结构在预计服役期内满足适用性和安全性要求提供一定的借鉴与参考。

关键词: 钢筋混凝土结构; 氯盐侵蚀; Gamma 过程; 寿命预测; 菲克第二定律

中图分类号: TU375

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)07-0016-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.07.086

Prediction on durability and life of reinforced concrete structures eroded by chloride in marine environment

ZHOU Meng, ZHANG Zhenhao, HUANG Yuhang, NING Zhongwei

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In the marine environment, the corrosion of steel bars caused by chloride ion intrusion is the main reason affecting the service life of reinforced concrete structures. Therefore, it is very important to propose a durability model to describe chloride ion intrusion to accurately predict the service life of port concrete structures. In this paper, MATLAB software is used to simulate the propagation process of chloride ions in reinforced concrete structures, and the obtained data is modeled by Gamma process, and a new method for predicting the durability life of reinforced concrete under chloride ion erosion is proposed. According to Fick's second law, the theoretical benchmark model of chloride ion diffusion in concrete is obtained. At the same time, the finite difference method and Monte Carlo method are used to obtain the chloride ion concentration data and structural durability data of the structural reinforcement surface under the action of multiple factors, and the histogram is made, which is compared with the theoretical curve of the durability life probability density function based on the Gamma process to prove the feasibility of the new method. The results show that the theoretical curve is in good agreement with the histogram, which indicates the accuracy and reliability of the durability model of reinforced concrete structures in the chloride salt erosion environment based on the Gamma process. The results can provide some

收稿日期: 2023-12-28

基金项目: 湖南省大学生创新创业训练计划资助项目 (S202210536068)

作者简介: 周 萌 (2003—), 女, 硕士研究生, 从事结构工程方面的研究。

通信作者: 张振浩 (1980—), 男, 教授、博士生导师, 从事结构工程方面的研究。

reference for ensuring that the port concrete structure meets the applicability and safety requirements during the expected service period.

Key words: reinforced concrete structure; chloride erosion; Gamma process; life expectancy; Fick' s second law

当钢筋混凝土结构处在氯盐侵蚀环境中时, Cl^- 会通过吸附、扩散、结合、渗透、毛细作用和弥散等 6 种传输方式穿过混凝土保护层到达钢筋表面。其中, 因 Cl^- 浓度梯度引起的扩散过程为最主要的迁移方式。目前, 基于扩散理论计算模拟 Cl^- 侵入混凝土的模型大多基于菲克第二定律。余红发等^[1] 基于菲克第二定律, 推导出综合考虑混凝土的 Cl^- 结合能力、混凝土结构微缺陷影响和 Cl^- 扩散系数的时间依赖性的新扩散方程, 得到了混凝土的 Cl^- 扩散理论基准模型。该模型解决了菲克第二定律在混凝土的适应性问题。滕海文等^[2] 通过建立多因素作用下的 Cl^- 侵蚀模型, 得到了考虑边界条件的侵蚀模型数学解。该模型不仅能反映结构受氯盐侵蚀时的发展趋势和构件不同深度处的 Cl^- 浓度, 还能预测不同时期钢筋的 Cl^- 质量分数及钢筋锈蚀的时间。KIRKPATRICK 等^[3] 建立了预测除了冰盐环境下混凝土桥面板的首次需要进行修复时间的统计模型。该模型综合考虑了影响 Cl^- 扩散过程因素的统计性质, 进而运用统计重采样技术扩展了目前已有的确定性模型。

为研究海洋环境下氯盐侵蚀环境下混凝土结构耐久性寿命的评估提供科学的方法和依据, 本文在已有研究内容的基础上, 提出一种新的寿命预测方法。基于钢筋混凝土结构表面 Cl^- 浓度仿真数据, 建立 Gamma 过程模型, 对结构进行寿命预测, 并与耐久性频率直方图进行对比分析, 验证该方法的可行性, 以期合理的设计参数和构造措施的选取以及确保港口混凝土结构在预计服役期内满足适用性和安全性要求提供一定的借鉴与参考。

1 基于 Gamma 过程的寿命分布建模

1.1 Gamma 过程定义

假设存在一个随机变量 x 满足形状参数为 v 、尺度参数为 u 的伽玛分布, 则该随机变量的期望和方差分别为 $v(t)/u$ 、 $v(t)/u^2$, 概率密度函数为

$$Ga(x|v, u) = \frac{u^v}{\Gamma(v)} x^{v-1} \exp\{-ux\} I_{(0, \infty)}(x) \quad (1)$$

式中: Ga 为伽马分布概率密度函数; $I_A(x) = 1$ 对于 $x \in A$, $I_A(x) = 0$ 对于 $x \notin A$, A 为 x 的取值范围, 为 $(0, \infty)$; $\Gamma(v)$ 为伽马函数。

$\Gamma(a)$ 为 $a > 0$ 的伽马分布函数, 具体如下。

$$\Gamma(a) = \int_{z=0}^{\infty} z^{a-1} e^{-z} dz \quad (2)$$

此外, 令 $v(t)$, $t \geq 0$ 为一个单调递增的连续实值函数, 且 $v(0) = 0$; 具有形状函数 $v(t) > 0$ 和尺度参数 $u > 0$ 的伽马过程为连续时间的随机过程 $\{X(t), t \geq 0\}$, 且伽玛过程 $X(t)$ 性质如下。

(1) 当概率为 1 时, $X(0) = 0$ 。

(2) 对于 $\forall s \geq 0$ (s 为任意大于 0 的实数), $t > 0$, 有 $X(s+t) - X(s) \sim Ga(v(s+t) - v(s), u)$ 。

(3) $X(t)$ 是独立增量过程。

1.2 Gamma 过程寿命分布建模

在实际工程中, 由于系统性能发生故障引起的许多不符合规定标准的物理破坏和性能破坏均属于首次超越问题的范畴, 一旦结构或者构件的性能退化过程 $X(t)$ 达到某个临界水平 l , 该结构或者构件就会失效。因此, 将结构发生故障的寿命时间 T 定义为 $X(t)$ 的退化路径第一次超过固定界限 l 时的时间, 既首次超越时间, 从而得到式(3)。

$$T = \inf\{X(t) \geq l\} = \{t | X(t) \geq l, X(s) < l \ 0 \leq s < t\} \quad (3)$$

当结构的耐久性退化过程 $X(t)$ 为非平稳的伽玛过程时, 其退化符合伽马分布, 故第一次通过固定界限时间 l 的时间分布为

$$F(t) = P(T \leq t) = P(X(t) \geq l) = \frac{\Gamma(v(t), lu)}{\Gamma(v(t))} \quad (4)$$

$$\Gamma(a, x) = \int_{z=x}^{\infty} z^{a-1} e^{-z} dz \quad (5)$$

式中: P 为概率; $\Gamma(a, x)$ 为 $a \geq 0$ 和 $x \geq 0$ 时的不完全伽马函数。利用链式法则求微分, 寿命的概率密度函数为

$$f(t) = \frac{v'(t)}{\Gamma(v(t))} \int_{lu}^{\infty} \{\log(z) - \psi(v(t))\} z^{v(t)-1} e^{-z} dz \quad (6)$$

$$\psi(a) = \frac{\Gamma'(a)}{\Gamma(a)} = \frac{\partial \log \Gamma(a)}{\partial a} \quad (7)$$

式中: 函数 $\psi(a)$ 为伽马函数对数的导数。

2 考虑多因素影响的 Cl^- 扩散分析

2.1 Cl^- 扩散数值模型

基于菲克第二定律的扩散理论是当前预测钢筋混凝土结构在氯盐环境中使用寿命的理论基础。菲克第二定律公式如下。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, x \in [0, L], t \in [0, T] \quad (8)$$

式中: D 为 Cl^- 扩散系数; C 为 Cl^- 浓度, mol/m^3 ; t 为氯盐侵蚀结构在氯盐侵蚀环境中的服役时间, s ; x 为距离结构表层的最短距离, m ; L 为距离结构表层的最短距离 x 的范围, m ; T 为 t 的取值范围, s 。

边界条件为

$$\begin{aligned} C(x, 0) &= f(x), x \in [0, L] \\ C(0, t) &= a(t), t \in [0, T] \end{aligned} \quad (9)$$

采用有限差分法求解已知边界条件的 Cl^- 扩散偏微分方程。对求解区域用网格划分, 用时间间隔为 Δt , 空间间隔为 Δx 的两组平行于坐标轴的直线将求解区域网格化, 两组直线的交点称为网格点或者结点 (i, j) , 如图 1 所示。其中 t_0 为起始时间; t_m 为时间终点; t_j 为任意一个时间点; x_0 为构件表面距离起点; x_n 为距离终点 (所关注的构件内部最大深度); x_i 为任意一个位置点; T 、 L 分别为时间 t 和构件深度 x 的最大值。

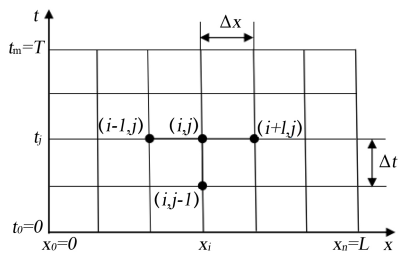


图 1 求解区域网格划分示意

以 x 轴为混凝土构件沿方向的深度, 以 y 轴为混凝土构件暴露的时间, 将 $C_{i,j}$ 作为深度为 x_i 、时间为 t_j 的 Cl^- 浓度近似值, 对式(9)进行近似:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{C(x, t) - C(x, t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (10)$$

$$x_i = i \cdot h, i = 0, 1, \dots, n \quad (11)$$

$$t_j = j \times g, j = 0, 1, \dots, m \quad (12)$$

$$h = L/n \quad (13)$$

$$g = T/m \quad (14)$$

式中: h 、 g 分别为求解区域网格化的纵横向单元格大小; m 为时间范围划分等级; n 为深度范围划分等级。

因此, $\partial C(i, j) / \partial t$ 的近似值为

$$\frac{\partial C(i, j)}{\partial t} \approx \frac{C(i, j) - C(i, j-1)}{\Delta t} \quad (15)$$

同理, 在结点 (i, j) 处近似 $\partial^2 C / \partial x^2$, 即:

$$\frac{\partial^2 C(i, j)}{\partial x^2} \approx \frac{C(i+1, j) - 2C(i, j) + C(i-1, j)}{\Delta x^2} \quad (16)$$

因此, Cl^- 扩散的偏微分方程在点 (i, j) 可近似为

$$\begin{aligned} \frac{C(i+1, j) - C(i, j-1)}{\Delta t} &= D \times \\ \frac{C(i+1, j) - 2C(i, j) + C(i-1, j)}{\Delta x^2} \end{aligned} \quad (17)$$

即:

$$\begin{aligned} C(i, j) &= C(i, j+1) - D \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \cdot (C(i+1, j+1) - \\ &2C(i, j+1) + C(i-1, j+1)) \end{aligned} \quad (18)$$

根据式(18), 代入边界条件 $C(x, 0) = C_0$, $C(0, t) = C_s$, 即可逐层求出 $C(i, j)$, 得到不同暴露时间混凝土截面上的 Cl^- 浓度分布。

2.2 多因素作用的表现 Cl^- 扩散系数

在式(17)的解析扩散方程中假定 Cl^- 扩散系数 D 为常量, 但在实际情况中, 混凝土水化过程需要经过很长时间才能完成, 因此 D 是一个随时间、 Cl^- 浓度等因素而变化的量。为更好地模拟 Cl^- 在混凝土中的扩散情况, 在已有研究的基础上, 基于 MATLAB 软件, 设计一种综合考虑水灰比、相对湿度、时间、温度、混凝土材料等因素作用下的 Cl^- 扩散系数模型。

(1) 水灰比的影响。水灰比决定水泥石毛细孔隙率, 而水泥石毛细孔隙率影响 Cl^- 在混凝土中的扩散, 因此 Cl^- 的扩散随着水灰比的降低而减缓。但由于扩散系数与水灰比的关系比较复杂, 目前没有建立统一的公式。本文以标准养护 28 d 试件实测的 Cl^- 扩散系数作为标准表现 Cl^- 扩散系

数 D_0 , 反映结构水灰比的不同。 D_0 的计算采用与水灰比有关的经验公式^[4], 即

$$D_0 = 10^{-12.06 + 2.4w/c} \quad (19)$$

式中: w 为水的用量, kg; c 为水泥用量, kg; w/c 为水灰比。

(2) 相对湿度的影响。相对湿度决定混凝土内部水通道的尺寸及数量, 而水通道尺寸及数量影响 Cl^- 在混凝土中的扩散, 因此 Cl^- 的扩散速度随相对湿度的降低而减小, 并存在临界相对湿度。相对湿度分析时采用考虑相对湿度对扩散系数的计算公式^[5], 即

$$D(h) = D_0 \times \left(1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)^4}\right)^{-1} \quad (20)$$

式中: h 为混凝土中的相对湿度; h_c 为临界相对湿度, 一般取 0.75。

(3) 时间因素的影响。随着时间的延续, 水泥水化程度增加, 混凝土的密实度增强, 从而阻碍 Cl^- 的扩散。时间因素分析采用扩散系数随时间衰减的数学表达式^[6], 即

$$D(t) = D_0 \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad (21)$$

式中: t_0 为混凝土的参考龄期, 一般为 28 d; n 为混凝土的龄期衰减系数。

(4) 龄期衰减系数的影响。受时间因素影响的主要参数为龄期衰减系数, 其取值与混凝土制备的材料等因素有关。龄期衰减系数反映 Cl^- 扩散系数随混凝土龄期增长而逐渐衰减的程度, Cl^- 在混凝土中的扩散速度随龄期衰减系数的增加而增加。龄期衰减系数计算公式^[7]:

$$n = 0.2 + 0.4(R_{FA}/50 + R_{SG}/70) \quad (22)$$

式中: R_{SG} 为矿渣的掺量百分比; R_{FA} 为粉煤灰的掺量百分比。一般来说粉煤灰掺量不超过 50%, 矿渣掺量不超过 70%。

(5) 温度因素的影响。温度对扩散系数的影响较为显著, 扩散系数随着温度的上升而变大, 同时结合性能又随着温度的升高而升高。温度因素的计算公式^[7]:

$$D(T) = D_0 \times \exp\left[\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (23)$$

式中: T_0 为养护 28 d 时的参照温度, K, 一般取 293 K; U 为扩散过程的激活能量, J/mol, 一般取

3 500 J/mol; R 为气体常数, J/(mol · K), 一般取 8.314 J/(mol · K)。

综上所述, 考虑水灰比、相对湿度、温度、时间等因素影响下的表观 Cl^- 扩散系数计算公式为

$$D_{cl} = D_0 \times \left(1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)^4}\right)^{-1} \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \times \exp\left[\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (24)$$

故, 考虑多因素作用下 Cl^- 扩散的数值模型可写为

$$C(i, j) = C(i, j+1) - D_{cl} \times \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \times (C(i+1, j+1) - 2C(i, j+1) + C(i-1, j+1)) \quad (25)$$

3 氯盐侵蚀混凝土结构耐久性寿命预测

3.1 基于蒙特卡洛方法的钢筋混凝土结构耐久性寿命预测

基于《既有结构混凝土耐久性评定标准》(GB/T 51355—2019)、《混凝土结构耐久性设计与施工指南》的相关条文规定, 对浪溅区和潮汐区环境下钢筋混凝土结构的使用寿命进行预测, 暂不考虑温湿度的影响。基于公式(20), 利用 MATLAB 软件对 Cl^- 扩散过程进行仿真, 编写多因素作用下 Cl^- 扩散数值模拟程序 (chloride modeling computer, CLMC 模型), 如图 2 所示。

氯盐侵蚀环境下的钢筋混凝土结构各影响因素的概率分布特征^[8-9]如表 1 所示。利用钢筋混凝土结构耐久性寿命预测程序 CLMC 进行蒙特卡洛模拟。根据各寿命影响因素的统计分布特征值, 生成相应的随机数, 并作为输入参数, 计算暴露时间下钢筋表面的 Cl^- 浓度 $C(x, t)$ 。通过计算钢筋表面 Cl^- 浓度超过临界 Cl^- 浓度 C_{crit} 的时间 t 得到钢筋混凝土结构的耐久性寿命时间 T , 进而得到 Cl^- 侵蚀环境下钢筋混凝土结构耐久寿命的分布特征。

3.2 基于 Gamma 过程的钢筋混凝土结构耐久性寿命预测

由于非平稳 Gamma 过程样品路径的单调性质, 氯盐侵蚀环境下钢筋混凝土结构寿命的累积分布函数为

$$F_T(t) = P(T \leq t) = P(X(t) \geq C_{crit}) =$$

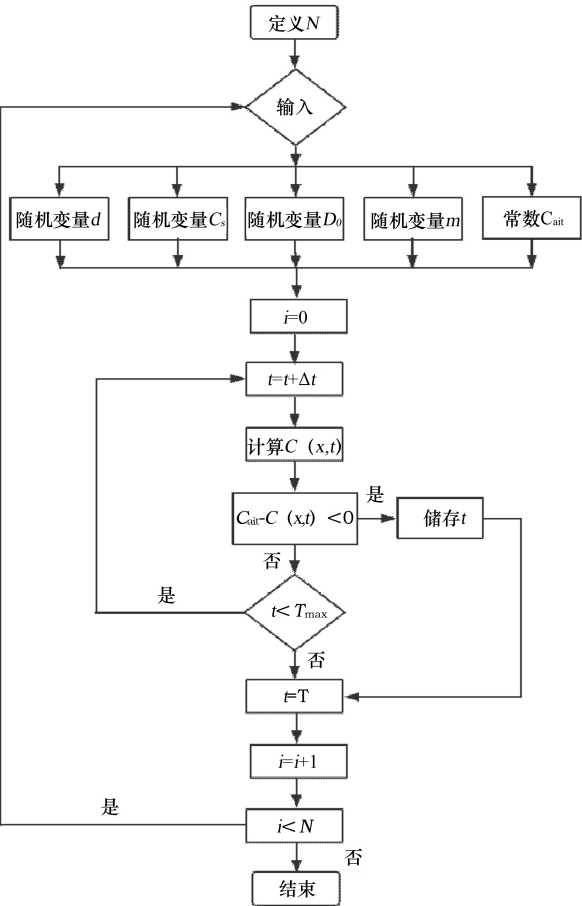


图 2 CLMC 程序流程

$$\frac{\Gamma(ct^b, C_{crit}u)}{\Gamma(ct^b)}$$
(26)

$$v(t) = ct^b$$
(27)

式中：Γ(a, x) 为 a ≥ 0 和 x ≥ 0 的不完全伽马函

数，C_{crit}为临界 Cl⁻ 浓度，取 0.09%；c、b 分别为形状参数和指数参数。

寿命的概率密度函数为

$$f_T(t) = \frac{cbt^{b-1}}{\Gamma(ct^b)} \int_{C_{crit}u}^{\infty} \{ \log(z) - \psi(ct^b) \} z^{ct^b-1} e^{-z} dz$$
(28)

$$\psi(a) = \frac{\Gamma'(a)}{\Gamma(a)} = \frac{\partial \log \Gamma(a)}{\partial a}$$
(29)

式中：ψ(a) 为伽马函数对数的导数。

基于 CLMC 程序，利用蒙特卡洛方法对钢筋混凝土结构某 6 组钢筋表面 Cl⁻ 浓度数据进行模拟分析。数据包括在不同年限(1 ~ 50 a)从 600 个钢筋混凝土结构中模拟获得的钢筋表面的 900 个 Cl⁻ 浓度值，并对年限 t 时刻的钢筋混凝土表面 Cl⁻ 浓度进行检测。基于实际工程考虑，在浪溅区和潮汐区的钢筋混凝土结构中选择 3 种(50、60、70 mm)保护层厚度进行仿真。表 2 为钢筋混凝土构件的相关参数。

将获得的仿真数据，通过最大化公式(8)中的对数似然函数进行非平稳 Gamma 过程中 3 个参数的估算。参数的最大似然估计结果如表 3 所示。

将浪溅区和潮汐区每组钢筋混凝土结构钢筋表面 Cl⁻ 浓度变化过程(即耐久性退化过程)以及该过程的参数估计值分别代入公式(22)，得到钢筋混凝土结构的耐久性寿命概率密度函数理论曲线。

表 1 钢筋混凝土结构寿命影响因素的概率分布

项目	表面 Cl ⁻ 浓度		保护层厚度		Cl ⁻ 扩散系数		临界 Cl ⁻ 浓度		龄期衰减系数	
	浪溅区	潮汐区	浪溅区	潮汐区	浪溅区	潮汐区	浪溅区	潮汐区	浪溅区	潮汐区
均值	0.74%	0.83%	50/60/70	50/60/70	10 × 10 ⁻¹¹	10 × 10 ⁻¹¹	0.09%	0.09%	0.4	0.4
标准差	0.22%	0.25%	3.5/3.6/4.9	3.5/3.6/4.9	2.5 × 10 ⁻¹¹	2.5 × 10 ⁻¹¹	—	—	0.1	0.1
弯异系数/%	30	30	7	7	25	25	—	—	25	25
分布类型	正态分布		正态分布		正态分布		—		正态分布	

表 2 钢筋混凝土结构的相关参数

分组编号	表面 Cl ⁻ 浓度/%	保护层厚度/mm	Cl ⁻ 扩散系数/10 ⁻¹⁰	临界 Cl ⁻ 浓度/%	龄期衰减系数	暴露区域
1	0.74	50	1	0.09	0.4	浪溅区
2	0.74	60	1	0.09	0.4	浪溅区
3	0.74	70	1	0.09	0.4	浪溅区
4	0.83	50	1	0.09	0.4	潮汐区
5	0.83	60	1	0.09	0.4	潮汐区
6	0.83	70	1	0.09	0.4	潮汐区

表 3 参数的最大似然估计值

分组编号	参数 c	参数 b	参数 u
1	0.245 90	1.027 8	79.396 3
2	0.118 70	0.985 7	64.350 9
3	0.070 10	1.009 7	67.009 6
4	0.242 00	0.964 5	60.317 9
5	0.139 70	1.018 4	73.979 3
6	0.081 16	1.029 3	74.855 8

3.3 对比验证

为验证新方法的正确性, 将基于 Gamma 过程的钢筋混凝土结构耐久性寿命概率密度函数理论与通过蒙特卡罗方法模拟得到的氯盐侵蚀环境下的钢筋混凝土结构耐久性寿命频率直方图进行对比分析, 结果如图 3 所示。由图 3 可知: 通过蒙特卡罗模拟获得的钢筋混凝土结构寿命直方图与耐久性寿命的概率密度函数理论曲线非常吻合。

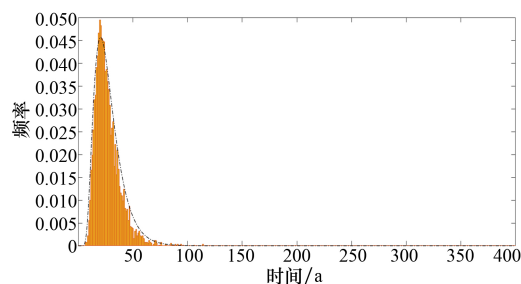


图 3 耐久性寿命概率密度函数曲线与直方图对比

4 结 论

本文深入研究了 Cl^- 在钢筋混凝土结构中的扩展过程, 利用 MATLAB 软件进行了仿真分析。通过不同时刻钢筋混凝土结构表面的 Cl^- 浓度数据, 基于 Gamma 过程构建了氯盐侵蚀环境下钢筋混凝土结构耐久性模型, 获得了钢筋混凝土结构的耐久性寿命累积分布函数曲线。通过与蒙特卡罗模拟得出的钢筋混凝土结构耐久性寿命直方图

进行对比, 表明两者轨迹吻合良好, 证实了运用 Gamma 过程对结构进行寿命预测的科学性和合理性。本文成果为理解 Cl^- 对钢筋混凝土结构的侵蚀提供了工具, 也为预测结构的耐久性寿命提供了新方法。

参考文献:

- [1] 余红发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 混凝土使用寿命预测方法的研究[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(6): 686-690.
- [2] 滕海文, 舒正昌, 黄颖, 等. 多因素作用下钢筋混凝土构件 Cl^- 扩散系数模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(1): 12-16.
- [3] KIRKPATRICK T J, WEYERS R E, ANDERSON-COOK C M, et al. Probabilistic model for the chloride-induced corrosion service life of bridge decks [J]. Cement&Concrete Research, 2002, 32(12): 1943-1960.
- [4] EHLEN M A. Life-365 Service Life Prediction Model and computer program for predicting the service life and life-cycle cost of reinforced concrete exposed to chlorides [R]. Life-365 Consortium, 2013.
- [5] BITARAF M, MOHAMMADIS. Analysis of chloride diffusion in concrete structures for prediction of initiation time of corrosion using a new meshless approach [J]. Construction and Building Materials, 2008(22): 546-556.
- [6] SONG H W, SHIM H B, PETCHERDCHOO A, et al. Service life prediction of repaired concrete structures under chloride environment using finite difference method [J]. Cement&Concrete Composites, 2009(31): 120-127.
- [7] Life-365 Service Life Prediction Model[CP/OL]. <http://www.life-365.org/download.html>.
- [8] 既有结构混凝土耐久性评定标准: GB/T 51355—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [9] 中国土木工程学会标准. 混凝土结构耐久性设计与施工指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.