

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202307072023101991

文章编号: 1674-599X(2023)05-0024-07

引用格式: 阳逸鸣, 周成坤, 陈欢, 等. 考虑参数空间相关性的RC结构初锈时间预测[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(5): 24-30.

Citation: YANG Yiming, ZHOU Chengkun, CHEN Huan, et al. Prediction of initial corrosion time of RC structures considering spatial correlation of parameters[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(5): 24-30.

考虑参数空间相关性的RC结构初锈时间预测

阳逸鸣, 周成坤, 陈欢, 唐皇, 李海

(湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000)

摘 要:为预测既有钢筋混凝土结构的初锈时间,采用K-L(Karhunen-Loève)级数展开法,建立锈蚀参数的随机场,并基于现有初锈时间预测模型,提出考虑锈蚀参数空间相关性的既有混凝土结构钢筋初锈时间预测模型。研究结果表明:相关长度越长,锈蚀参数随机场分布曲面就越光滑,整体的波动强度就越小;增大相关长度会显著提高钢筋初锈时间的极差,但钢筋初始锈蚀时间均值基本保持不变;考虑锈蚀参数空间相关性的结构初锈时间较传统方法的预测结果大幅提前,现有初锈时间预测方法低估了结构的早期锈蚀风险。

关键词:钢筋混凝土结构;锈蚀;空间相关性;K-L级数展开法;相关长度

中图分类号: TU375

文献标志码: A

Prediction of initial corrosion time of RC structures considering spatial correlation of parameters

YANG Yiming, ZHOU Chengkun, CHEN Huan, TANG Huang, LI Hai

(School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: To reasonably predict the initial corrosion time of existing reinforced concrete structures, the random field of corrosion parameters is established using Karhunen-Loève (K-L) series expansion method. Then, combined with the existing initial corrosion time prediction model, a method for predicting the initial corrosion time of existing reinforced concrete structures considering the spatial correlation of corrosion parameters is proposed. The results show that the increase of correlation length can lead to the smoother surface of the random field distribution of corrosion parameters and the smaller the overall fluctuation intensity. Moreover, increasing the correlation length can result in the increase of the range of the initial corrosion time, but the mean value of the initial corrosion time is not sensitive to the change of the correlation length. In addition, the existing methods for predicting the initial corrosion time underestimates the corrosion risk of structures. In this case, the initial corrosion time of structures considering the spatial correlation of corrosion parameters can be advanced by 41.9%, 53.2% and 63.4% respectively when 0.5, 1 and 3 times of the standard correlation length are used. The research results can provide a research basis for the durability and safety evaluation of existing reinforced concrete structures.

Key words: reinforced concrete structure; corrosion; spatial correlation; K-L series expansion method; correlation length

海洋及除冰盐环境下既有钢筋混凝土结构的安全性和耐久性评估是目前的研究热点^[1-2]。氯离子引起的钢筋锈蚀是既有钢筋混凝土结构承载力

和耐久性显著降低的主要原因^[3-4]。因此,为了确保既有钢筋混凝土结构的正常使用,以及制定维修加固策略,需要对钢筋的初始锈蚀时间进行合理

收稿日期: 2023-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208166);湖南省科技创新计划项目(2022RC1186)

作者简介: 阳逸鸣(1991—),男,湖南城市学院副教授,硕士生导师。E-mail: yangyiming@hncu.edu.cn

预测。

现有混凝土结构初始锈蚀时间预测模型大多假设锈蚀参数在空间上均匀分布,通常仅考虑锈蚀参数的时变性和不确定性。张建仁等^[5]建立了综合考虑预应力、氯离子结合作用、劣化效应、温度、湿度等多因素影响的初锈时间预测模型。LI等^[6]提出了一种考虑氯离子扩散系数和表面氯离子浓度时间依赖性的掺矿渣钢筋混凝土结构的初锈时间预测模型。ZHANG等^[7]利用三阶矩方法,提出了钢筋初始锈蚀的随机模型。LENG等^[8]建立了一种考虑最大值现象的双时变氯离子扩散模型,并提出了适用于海洋环境的混凝土结构初锈时间预测模型。庄华夏^[9]研究了氯离子在潮差区混凝土中的扩散规律,并提出了潮差区钢筋混凝土结构初锈时间预测方法。然而,越来越多的实测数据表明:表面氯离子浓度、氯离子扩散系数和混凝土保护层厚度等锈蚀参数存在明显的空间相关性^[10-11],导致不同位置处的氯离子扩散存在明显的空间差异。因此,为了确保既有混凝土结构满足耐久性 & 安全性要求,亟须提出一种考虑锈蚀参数空间相关性的混凝土结构钢筋初锈时间的预测方法。

本研究采用K-L级数展开法,对锈蚀参数随机场进行离散,研究表面氯离子浓度 C_s 、临界氯离子浓度 C_{cr} 、氯离子扩散系数 D_c 及混凝土保护层厚度 C 等锈蚀参数的空间分布特征,并基于现有初锈时间预测模型,提出考虑锈蚀参数空间相关性的既有混凝土结构钢筋初锈时间预测模型,以期对既有钢筋混凝土结构的耐久性和安全性评估提供借鉴。

1 锈蚀参数随机场模拟方法

目前,常用的随机场模拟方法有 midpoint 法、空间平均法、谱表示法和级数展开法等^[12-13]。K-L级数展开法作为一种极为重要的研究法,具有计算效率高、计算精度高、全局误差小等优点,被广泛用于随机场模拟。且K-L级数展开法对均匀和非均匀随机场、高斯和非高斯随机场^[14]的模拟均适用。与非连续性模拟方法(点离散和平均离散)相比,K-L级数展开法得到的模拟结果为一连续随机变量,更符合实际情况。同时,相较于其他展开方法,该方法能用有限的展开阶数获得最优的整体均方差。因此,本研究采用该方法对表面和临界氯离子浓度、氯离子扩散系数及混凝土保护层厚度等锈蚀参数的随机场进行模拟。

根据K-L级数展开法的定义,均匀随机场 S_u 通常可分解为:1) 该参数的确定性均值部分;2) 可表示为独立随机变量和协方差矩阵相应特征函数乘积部分的线性组合,两者的和即为随机场模拟结果,其计算式为:

$$S_u = \mu_{s,u} + \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} \zeta_{i,\theta} \varphi_{i,u} \quad (1)$$

式中: $\mu_{s,u}$ 为该参数随机场的均值; $\{\zeta_{i,\theta}, i=1,2,\dots,n\}$ 为随机场 S_u 展开阶数为 i 时的随机变量; λ_i 和 $\varphi_{i,u}$ 分别为均匀随机场 S_u 相应协方差矩阵的第 i 阶特征值及该特征值所对应的特征向量。

求解第二类Fredholm积分,得到:

$$\int_{\Omega} C_{SS(u_1, u_2)} \varphi_{i, u_1} du_1 = \lambda_i \varphi_{i, u_2} \quad (2)$$

式中: $C_{SS(u_1, u_2)}$ 为协方差函数; u_1, u_2 分别为不同位置的独立随机变量。

由式(2)可知,协方差函数具有对称、正定和有界的特点。因此,在有界区域 D 上,特征函数集形成完备正交集,且满足归一化条件:

$$\int_{\Omega} \varphi_{i, u} \varphi_{j, u} du = \delta_{ij} \quad (3)$$

式中: δ_{ij} 为Kronecker-Delta函数,当 $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$;当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$ 。

K-L级数展开法中协方差函数矩阵的特征值通常具有快速降低的特点,这保证随机场模拟在有限项级数时达到较高的精度。考虑模拟精度及计算成本的平衡,本研究选取截段K-L展开法对随机场 $S_{(u)}$ 进行近似估计,则式(1)可改写为:

$$S_u \approx \bar{S}_u = \mu_{s,u} + \sum_{i=1}^M \sqrt{\lambda_i} \zeta_{i,\theta} \varphi_{i,u} \quad (4)$$

式中: M 是有限项级数; \bar{S}_u 为随机场 S_u 的近似估计值。

协方差矩阵的特征值及相应特征向量的求解方法有:①当协方差服从指数分布和高斯分布时,直接对式(2)进行求解;②采用数值方法或迭代算法^[14]求解。目前,指数型协方差函数由于求解便利和适用范围广的优点,其在土木工程领域被广泛运用。因此,本研究也采用指数型协方差函数来构建锈蚀参数随机场。常用的指数型协方差函数的表达式为:

$$C_{SS(u_1, u_2)} = \sigma_s^2 \exp\left(-\frac{|u_1 - u_2|}{d_s}\right) \quad (5)$$

式中: σ_s 为随机场的标准差; d_s 为随机场的相关距离。

采用指数型协方差函数时,式(2)可改写为:

$$\int_{\Omega} \sigma_s^2 \exp\left(-\frac{|u_1 - u_2|}{d_s}\right) \varphi_{u_1} du = \lambda \varphi_{u_2} \quad (6)$$

根据文献[14]的推导,特征值及相应特征向量可求解:

1) 特征值。

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{2d_s \sigma_s^2}{\omega_i^2 d_s^2 + 1}, & i \text{ 为奇数} \\ \lambda_i^* = \frac{2d_s \sigma_s^2}{(\omega_i^*)^2 d_s^2 + 1}, & i \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (7)$$

2) 相应的特征向量。

$$\begin{cases} \varphi_{i,u} = \frac{\cos(u\omega_i)}{\sqrt{\frac{d_s}{2} + \frac{\sin(d_s \omega_i)}{2\omega_i}}}, & i \text{ 为奇数} \\ \varphi_{i,u}^* = \frac{\cos(u\omega_i^*)}{\sqrt{\frac{d_s}{2} - \frac{\sin(d_s \omega_i^*)}{2\omega_i^*}}}, & i \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (8)$$

式中: ω_i 和 ω_i^* 为超越方程式(9)和(10)的解,通常可采用二分法求解,具体过程见文献[15]。

$$\begin{cases} \frac{1}{d_s} - \omega_i \tan\left(\frac{\omega_i d_s}{2}\right) = 0 \\ \omega_i^* + \frac{1}{d_s} \tan\left(\frac{\omega_i^* d_s}{2}\right) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\omega_i, \omega_i^* \in \left[\frac{\pi(i-1)}{d_s}, \frac{\pi i}{d_s}\right] \quad (10)$$

基于式(7)~(8),获得协方差矩阵的特征值及特征向量后,即可将其带入式(4)得到随机场的近似估计,从而分析表面和临界氯离子浓度、氯离子扩散系数及混凝土保护层厚度等锈蚀参数的空间相关性特征。

2 混凝土结构钢筋初锈时间预测模型

饱和混凝土中的氯离子扩散主要由浓度梯度或电势梯度驱动,而对于非饱和混凝土,氯离子扩散取决于压力梯度^[16]。尽管在不同使用环境下,混凝土中氯离子的迁移机理不同,但暴露于海洋环境的混凝土中氯离子的迁移行为通常采用FICK扩散第二定律进行描述^[17]。给定初始和边界条件,当氯离子扩散系数和表面氯离子浓度恒定时,氯离子扩散方程的解析解可表示为^[18]:

$$C_{x,t} = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}}\right) \right] \quad (11)$$

式中: $C_{(x,t)}$ 为 t 时刻距表面深度 x 处的氯离子浓度; C_0 和 C_s 分别为混凝土中的初始氯离子浓度和表面氯离子浓度; D_c 为氯离子扩散系数,erf为高斯误差函数。

当临界氯离子浓度为 C_c ,且混凝土保护层厚度为 C 时,钢筋初始锈蚀时间式(11)改写为:

$$t_c = \frac{C^2}{4D_c} \frac{1}{\left[\operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{C_0 - C_{cr}}{C_0 - C_s}\right) \right]^2} \quad (12)$$

当考虑锈蚀参数的空间相关性时,先利用K-L级数展开法对所有锈蚀参数随机场进行离散化处理;然后,将离散结果带入式(12)中,计算各离散位置的初始锈蚀时间;最后,基于最不利原则,即可获得考虑锈蚀参数相关性时的既有混凝土结构的初始锈蚀时间。

3 案例分析

为验证本预测模型的有效性,以某滨海区截面尺寸为40 m×20 m的既有钢筋混凝土板为例,利用二维均匀随机场,对该构件的锈蚀参数空间相关性分布特征及初锈时间进行预测。在基于K-L级数展开法进行锈蚀参数的随机场模拟时,选用指数型相关函数作为协方差函数,展开截断阶数 M 设定为10,且不考虑各参数在 x 和 y 方向空间相关的差异性,即认为两方向的相关长度相同。初始相关长度的选取见文献[10]。锈蚀参数空间分布特征参数见表1。

表1 锈蚀参数空间分布特征参数

Table 1 Spatial distribution statistics characteristics of corrosion parameters

锈蚀参数均值	变异系数	分布	数据来源	初始相关长度/m
$C_s=3.5 \text{ kg/m}^3$	0.14	正态分布	文献[19]	$d_{0,C_s}=1.00$
$C_{cr}=2 \text{ kg/m}^3$	0.2	正态分布	文献[20]	$d_{0,C_{cr}}=1.75$
$D_c=0.631 \text{ cm}^2/\text{a}$	0.2	对数正态分布	文献[20]	$d_{0,D_c}=1.12$
$C=4.1 \text{ cm}$	0.126	正态分布	实测	$d_{0,C}=1.46$

1) 相关长度对参数空间分布的影响。

相关长度是随机场模拟过程中的关键参数,为

研究其对锈蚀参数随机场模拟结果的影响,本研究以初始相关长度为基准,在50%、100%和300%初始相关长度3种工况下研究4种锈蚀相关参数的随机场模拟,结果分别如图1~4所示。图1(a)、图2(a)、图3(a)、图4(a)分别为相关长度为1倍初始相关长度工况下 C_s 、 C_{cr} 、 D_c 和 C 的随机场模拟结果。从图1(a)、图2(a)、图3(a)、图4(a)中均可以看出,这4种锈蚀参数在局部区域都呈现一定的相关性,而在整体上各参数的分布均表现为“多峰”形态,即具有较强的空间变异性。在表面氯离子浓度 C_s 的随机场模拟结果(图1(a))中,混凝土表面氯离子浓度 C_s 最大值为 3.895 kg/m^3 ,所在位置的坐标为(26.5, 14.5) m,而 C_s 最小值为 3.213 kg/m^3 ,所在位置坐标为(4.0, 4.5) m,最大值比最小值高21.23%;在保护层厚度 C 的随机场模拟结果(图4(a))中, C 值最大和最小位置分别为(27.0, 4.5) m和(30.0, 15.5) m,对应的数值分别为4.38 cm和3.63 cm,前者比后者高达20.66%。从图1~4中还可看出,相关长度的增加会导致这4种锈蚀参数的随机场分布曲面越光滑,表明:这些参数在结构的不同位置处的空间相关性也越强,即整体波动强度越小。

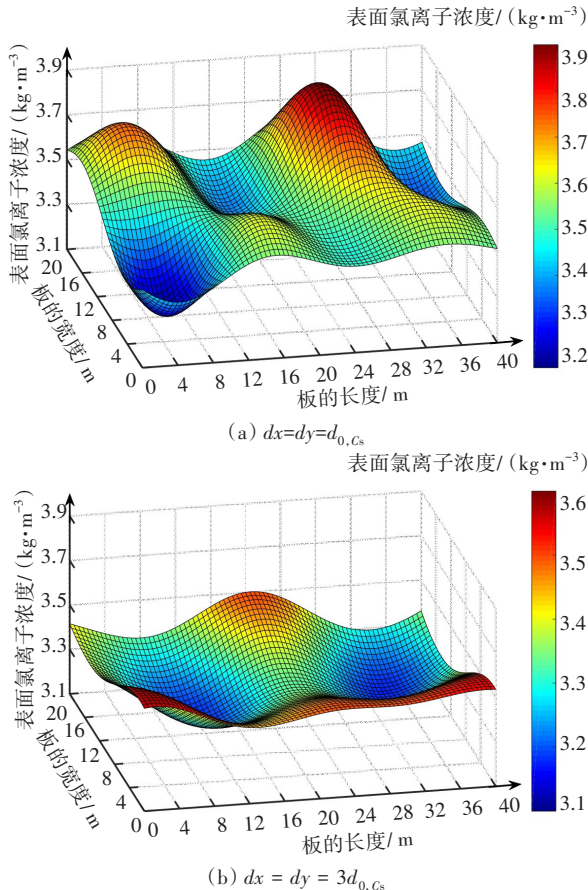


图1 C_s 随机场模拟结果
Fig. 1 Random field simulation results of C_s

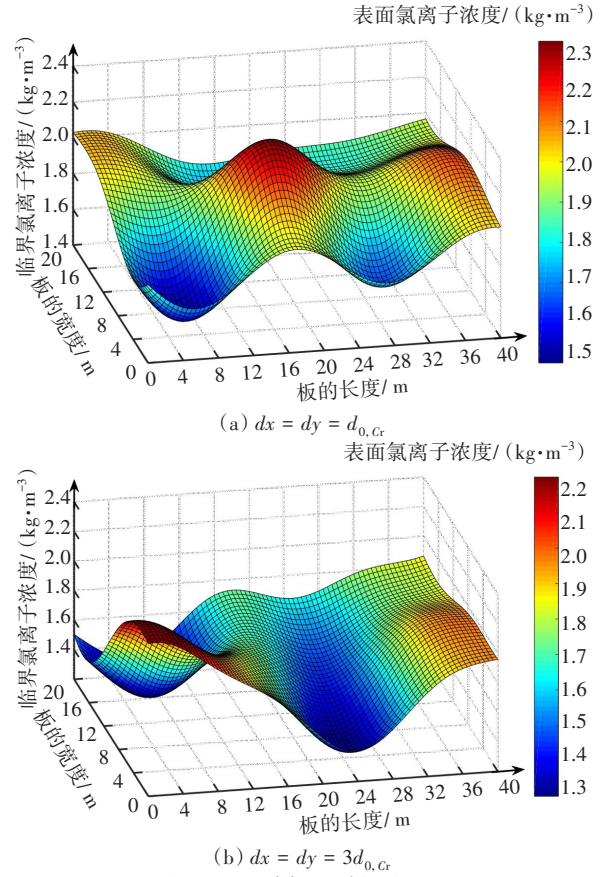


图2 C_{cr} 随机场模拟结果
Fig. 2 Random field simulation results of C_{cr}

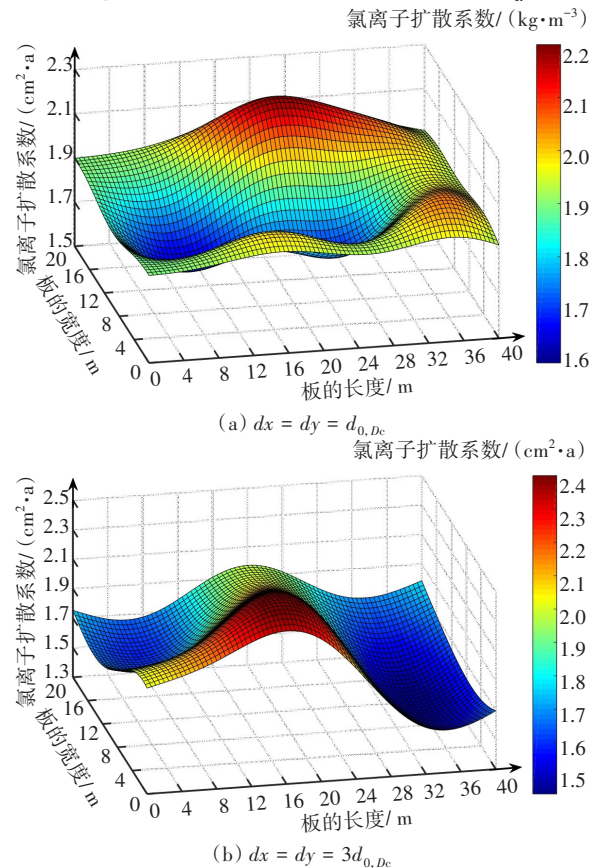


图3 D_c 随机场模拟结果
Fig. 3 Random field simulation results of D_c

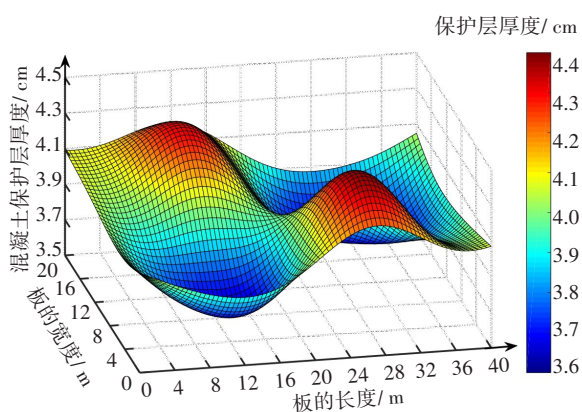
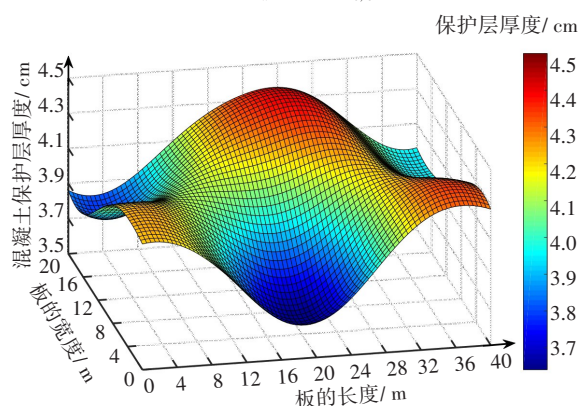
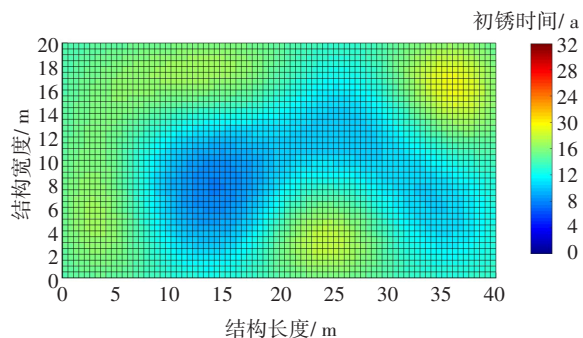
(a) $d_x = d_y = d_{0,c}$ (b) $d_x = d_y = 3d_{0,c}$

图4 C随机场模拟结果

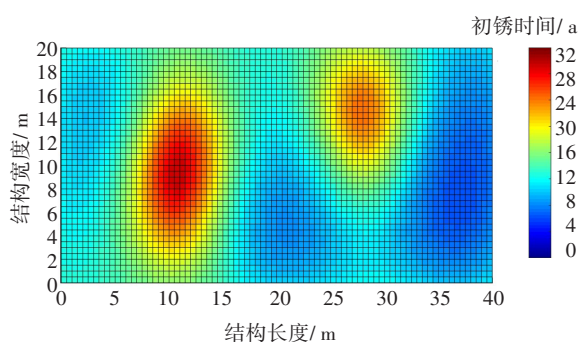
Fig. 4 Random field simulation results of concrete cover

2) 相关长度对钢筋初锈时间的影响

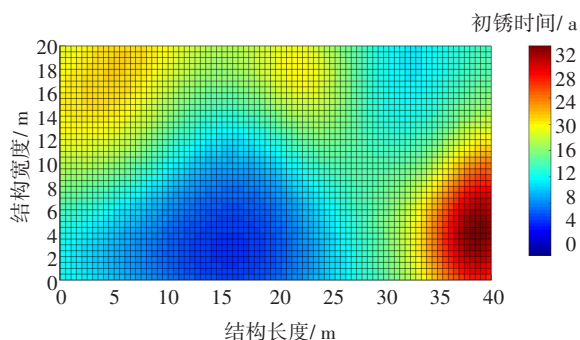
基于本随机场模拟结果,不同相关长度组合工况下的钢筋初锈时间预测结果,如图5所示。从图5可以看出,相关长度分别为50%、100%和300%工况下钢筋初锈时间的波动范围依次为[7.9, 19.3] a、[6.6, 29.4] a和[5.3, 31.9] a,相应的极差分别为11.4、22.8和26.6 a。这表明增大相关长度会导致钢筋初锈时间的极差显著提高。与之相反,钢筋初锈时间均值对相关长度的改变并不敏感,3种工况下,初锈时间均值分别为13.6、14.1和14.5 a,变化幅度不明显。



(a) 0.5倍初始相关长度



(b) 初始相关长度



(c) 3倍初始相关长度

图5 不同相关长度组合下的结构初锈时间

Fig. 5 Initial corrosion time under different combinations of correlation length

与用传统钢筋混凝土结构初锈时间预测结果相比(即以各位置处初锈时间的平均值作为预测结果),当相关长度分别为50%、100%和300%时,考虑锈蚀参数空间相关性的结构初锈时间分别提前了41.9%、53.2%和63.4%,表明:传统预测方法低估了结构的锈蚀风险,延误结构抗锈措施的实施,且不利于后续结构服役状态评估及维修加固策略的制定及优化。因此,基于实测数据合理估计锈蚀参数的波动系数,并考虑锈蚀参数空间相关性影响,对合理预测混凝土结构初锈时间至关重要。

4 结论

基于K-L级数展开法,对锈蚀参数进行随机场模拟,并考虑锈蚀参数空间相关性,对既有混凝土结构初锈时间进行预测,得出结论:

1) 相关长度的增加会导致锈蚀参数的随机场分布曲面光滑,表明:这些参数在结构不同位置处的空间相关性也越强,即整体波动强度越小。

2) 增大相关长度会导致钢筋初锈时间的极差

显著提高,但钢筋初锈时间均值对相关长度的改变并不敏感。

3) 现有初锈时间预测方法会低估结构的锈蚀风险,当采用50%、100%和300%相关长度时考虑锈蚀参数空间相关性的结构初锈时间较现有方法分别提前了41.9%、53.2%和63.4%。

参考文献(References):

- [1] YANG Yiming, PENG Jianxin, CAI Chunsheng, et al. Improved interval evidence theory - based fuzzy AHP approach for comprehensive condition assessment of long-span PSC continuous box-girder bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(12): 04019113. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001494.
- [2] ZHANG Xuhui, HE Fengbo, CHEN Ji, et al. Orientation of steel fibers in concrete attracted by magnetized rebar and its effects on bond behavior[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 138: 104977. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.104977.
- [3] PENG Jianxin, YANG Yiming, BIAN Hanbing, et al. Optimisation of maintenance strategy of deteriorating bridges considering sustainability criteria[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2022, 18(3): 395-411. DOI: 10.1080/15732479.2020.1855215.
- [4] CHEN Suiyao, LU Lu, XIANG Yisha, et al. A data heterogeneity modeling and quantification approach for field pre-assessment of chloride-induced corrosion in aging infrastructures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 171: 123-135. DOI: 10.1016/j.res.2017.11.013.
- [5] 张建仁, 王华, 彭建新, 等. 多因素腐蚀环境下混凝土结构的初锈时间模型及其可靠度分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2012, 9(1): 34-40. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2012.01.006.
ZHANG Jianren, WANG Hua, PENG Jianxin, et al. Initiation time model and its reliability analysis for concrete structures under multi-corrosive factors[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2012, 9(1): 34-40. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2012.01.006.
- [6] LI Chenzhi, SONG Xiaobin, JIANG Linhua. A time-dependent chloride diffusion model for predicting initial corrosion time of reinforced concrete with slag addition[J]. Cement and Concrete Research, 2021, 145: 106455. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106455.
- [7] ZHANG Xiaogang, WANG Jiao, ZHAO Yangang, et al. Time-dependent probability assessment for chloride induced corrosion of RC structures using the third-moment method[J]. Construction and Building Materials, 2015, 76: 232-244. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.039.
- [8] LENG Yu, LU Zhaohui, LI Chunqing, et al. Time-variant probabilistic assessment of corrosion initiation of marine concrete structures considering maximum phenomenon[J]. Construction and Building Materials, 2021, 272: 121967. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121967.
- [9] 庄华夏. 潮差区混凝土氯离子侵蚀试验及钢筋初锈时间研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
ZHUANG Huaxia. Study on experiment of chloride ion erosion and initial corrosion time of steel bar in concrete under the tidal area[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.
- [10] YANG Yiming, PENG Jianxin, ZHANG Jianren, et al. A new method for estimating the scale of fluctuation in reliability assessment of reinforced concrete structures considering spatial variability[J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(13): 1951-1962. DOI: 10.1177/1369433218760891.
- [11] GONG Changqing, FRANGOPOL D M. Time-variant hull girder reliability considering spatial dependence of corrosion growth, geometric and material properties[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 193: 106612. DOI: 10.1016/j.res.2019.106612.
- [12] 舒苏荀, 龚文惠, 王佳, 等. 各向异性随机场下的边坡模糊随机可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1204-1210. DOI: 10.11779/CJGE201507005.
SHU Suxun, GONG Wenhui, WANG Jia, et al. Fuzzy-random reliability analysis of slope stability in anisotropic random fields[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1204-1210. DOI: 10.11779/CJGE201507005.
- [13] YANG Yiming, PENG Jianxin, CAI Chunsheng, et al.

- Time-dependent reliability assessment of aging structures considering stochastic resistance degradation process[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 217: 108105. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108105.
- [14] GHANEM R G, SPANOS P D. Stochastic finite elements: spectral approach [M]. New York, NY: Springer New York, 1991. DOI: 10.1007/978-1-4612-3094-6.
- [15] YU Zhiwu, CHEN Ying, LIU Peng, et al. Accelerated simulation of chloride ingress into concrete under drying-wetting alternation condition chloride environment [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 205-213. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.090.
- [16] WANG Hailong, DAI Jianguo, SUN Xiaoyan, et al. Time-dependent and stress-dependent chloride diffusivity of concrete subjected to sustained compressive loading [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28 (8) : 04016059. DOI: 10.1061/(asce) mt. 1943-5533.0001578.
- [17] LU Zhaohui, ZHAO Yangang, YU Zhiwu, et al. Probabilistic evaluation of initiation time in RC bridge beams with load-induced cracks exposed to de-icing salts [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(3): 365-372. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.12.003.
- [18] SHAFEI Behrouz, ALIPOUR Alice. Application of large-scale non-Gaussian stochastic fields for the study of corrosion-induced structural deterioration [J]. Engineering Structures, 2015, 88: 262-276. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.12.024.
- [19] GUO Tong, SAUSE R, FRANGOPOL D M, et al. Time-dependent reliability of PSC box-girder bridge considering creep, shrinkage, and corrosion [J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16 (1) : 29-43. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000135.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:李岳林)

(上接第9页)

- Construction and Building Materials, 2018, 161: 236-245.
- [20] 陈昌, 杨绿峰, 余波. 海洋潮汐区混凝土表面氯离子浓度的时变规律及多因素模型[J]. 材料导报, 2019, 33 (增刊2): 321-326.
- CHEN Chang, YANG Lyufeng, YU Bo. Multi-factor model and time-varying law for surface chloride concentration of concrete in marine tidal zone [J]. Materials Reports, 2019, 33(sup2): 321-326.
- [21] BAO J W, WEI J N, ZHANG P, et al. Experimental and theoretical investigation of chloride ingress into concrete exposed to real marine environment [J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 130: 104511.
- [22] 张荣亮, 杨建宇, 易伟建. 沿海大气环境混凝土表面氯离子浓度与氯离子扩散系数相关性研究[J]. 公路, 2018, 63(7): 304-308.
- ZHANG Rongliang, YANG Jianyu, YI Weijian. Correlation between chloride ion concentration and chloride ion diffusion coefficient on concrete surface in coastal atmospheric environment [J]. Highway, 2018, 63 (7): 304-308.
- [23] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程混凝土试验检测技术规范: JTS/T 236-2019 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- CCCC Tianjin Harbor Engineering Research Institute Co., Ltd.. Testing specification for concrete testing of port and waterway engineering: JTS/T 236—2019. [S]. Beijing, China Communications Press, 2019.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:李岳林)