

基于贝叶斯理论的氯离子扩散系数计算模型

罗大明^{1,2}, 张桂涛^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀是沿海或者盐湖地区混凝土结构耐久性劣化的主要诱因, 现有氯离子侵蚀模型中的扩散系数多基于 Fick's 第二定律, 由实验室试验或工程测试确定, 具有一定的局限性. 基于氯离子扩散系数试验数据, 采用贝叶斯理论, 建立了氯离子扩散系数计算模型. 该模型综合考虑了水胶比、侵蚀时间、环境温度、相对湿度等因素对氯离子扩散系数的影响, 能较好地反映氯离子扩散系数的变化情况. 通过已有试验数据验证表明, 该模型的计算结果与试验结果吻合较好, 具有一定的理论和应用价值.

关键词: 氯离子; 扩散系数; 贝叶斯理论; Fick's 第二定律; 混凝土耐久性

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)05-0710-07

Calculation model of chloride diffusion coefficient based on Bayesian theory

LUO Daming^{1,2}, ZHANG Guitao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Reinforcement corrosion caused by chloride ion erosion is the main factor of durability deterioration of concrete structures in coastal or salt lake areas. The diffusion coefficient calculated by existing chloride ion erosion models is mostly based on Fick's second law, which is determined by laboratory test or field test. The calculation method has some limitations. Based on the experimental data of chloride diffusion coefficient and Bayesian theory, a calculation model of chloride diffusion coefficient was established. The model takes into account the effects of water-binder ratio, service time, ambient temperature and relative humidity on chloride diffusion coefficient, which can better reflect the variation of chloride diffusion coefficient. The validation of the existing experimental data shows that the calculated results of the model are in good agreement with the experimental results, and the established model has certain theoretical and practical value.

Key words: chloride ion; diffusion coefficient; Bayesian theory; Fick's second law; concrete durability

随着我国经济的迅猛发展, 基础设施规模不断增大, 既有建筑规模已超过 720 亿 m², 其中, 使用年限超过 30 年的既有结构占总量的 30% 以上, 长期服役过程中由于环境作用, 结构的耐久性能发生退化, 导致结构的服役寿命远小于设计寿命, 给社会带来巨大的经济损失^[1]. 碳化作用、酸雨作用、冻融循环作用、氯盐侵蚀、硫酸盐侵蚀等环境作用是造成既有结构耐久性损伤的主要因素, 其中, 沿海和盐湖地区的混凝土结构普遍存在氯离子侵蚀危害, 导致建筑结构承载力不足, 无法继续服役.

近些年来我国学者逐步开展了一些针对氯离子侵蚀模型的研究, 在试验研究方面积累了大量的信息和经验, 通过考虑不同因素的影响, 建立

了不同形式的氯离子侵蚀模型. 滕海文等^[2]通过试验数据, 建立了考虑水灰比、温度、时间、湿度与氯离子结合作用的氯离子扩散理论模型. 金伟良等^[3]建立了随暴露时间和侵蚀深度变化的氯离子浓度模型. 余红发等^[4]基于 Fick's 第二定律, 推导出综合考虑混凝土的氯离子结合能力、氯离子扩散系数的时间依赖性和混凝土结构微缺陷影响的氯离子扩散理论模型. 孙丛涛等人^[5]探讨了水胶比对氯离子扩散性能的影响, 考虑了氯离子扩散系数对时间的依赖性, 建立了氯离子有效扩散系数与表观扩散系数之间的关系模型. 这些模型是依据 Fick's 第二定律, 通过对氯离子扩散系数影响因素的修正, 建立试验条件下氯离子扩散系数理论计算模型. 由于外界环境的随机性和氯离子

收稿日期: 2018-01-21

修改稿日期: 2019-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808438, 51509014)

第一作者: 罗大明(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事混凝土及混凝土结构耐久性研究. E-mail: dmluo@xauat.edu.cn

侵蚀机理的复杂性,氯离子的传输行为还难以用精确的解析式表达.考虑现有模型具有影响因素不全或形式太过复杂等局限性,需要建立因素更全面、形式更简洁的氯离子扩散系数的实用计算模型.

贝叶斯理论可依据先验模型,结合先验信息,考虑偏差修正,得到具有广泛规律性的后验模型.目前,贝叶斯理论已广泛应用于社会各个领域,包括气象水利、航天航空、金融、生态医学等.本文尝试将贝叶斯理论运用到氯离子侵蚀研究领域.根据现有氯离子侵蚀试验数据,考虑现有模型的随机性与影响因素的局限性,利用现有的试验数据信息和考虑偏差的修正项,建立综合考虑时间依赖性、水胶比、环境温度和湿度的氯离子扩散系数计算模型.

1 贝叶斯理论

贝叶斯理论是应用所观察到的现象对有关概率分布的主观判断(先验概率)进行修正的标准方法,或者可以通过先验信息确定先验分布,根据贝叶斯理论公式,由先验分布求得后验分布,用公式表示为^[6]

$$\pi(\theta/x) = \frac{h(x, \theta)}{m(x)} \quad (1)$$

式中: $m(x) = \int_{\Theta} h(x, \theta) d\theta = \int_{\Theta} f(x/\theta) \pi(\theta) d\theta$ 是 X 的边缘分布, $h(x, \theta) = f(x/\theta) \pi(\theta)$ 是 X 和 θ 的联合分布密度函数, $f(x/\theta)$ 是样本的密度函数(也称为似然函数), $\pi(\theta)$ 是 θ 的先验密度.贝叶斯假设表示,参数 θ 的无先验信息分布 $\pi(\theta)$ 在 θ 的取值范围内是“均匀分布”的.在贝叶斯假设下, $\pi(\theta)$ 与 θ 无关,故上述后验分布可表示为

$$\pi(\theta/x) = \frac{f(x/\theta) \pi(\theta)}{m(x)} \propto f(x/\theta) \quad (2)$$

上式表明,后验分布的核就是似然函数 $f(x/\theta)$.

2 基于贝叶斯理论的氯离子扩散系数计算模型

贝叶斯理论可用于处理多参数模型,且处理方法与单参数的处理方法类似,因此,考虑影响氯离子扩散系数的诸多可测变量 $X = (x_1, x_2, \dots)$, 如:温度、湿度、内外氯离子浓度差、混凝土孔隙率等作为自变量,基于贝叶斯理论的多参数模型,通过现有研究的氯离子扩散试验数据给固定变量或随机变量 X 提供一种可预测多因素的方法.当模型中只能检测一个变量时用单变量预

测,可检测到多个量时用多变量预测.接下来将以模型的单变量形式开始讨论,然后推广到多变量的情况^[7].

基于 Fick's 第一定律的单变量氯离子侵蚀模型形式如下:

$$C = C(X, \Theta) \quad (3)$$

式中: Θ 是对拟合试验数据进行修正的试验参数,这些参数是为了使模型与试验结果相符而引入的; C 是氯离子侵蚀变量影响下的氯离子扩散系数; $C(X, \Theta)$ 是包含误差的完整形式的代数表达.

基于上述理论,在大量氯离子侵蚀试验数据的基础上,考虑误差修正,建立新的氯离子扩散系数模型.因此,采用总体单变量的氯离子侵蚀模型形式为

$$C(X, \Theta) = c_d(X) + \gamma(X, \theta) + \varepsilon \quad (4)$$

式中: $\Theta = (\theta, \sigma)$, $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots)$, 提供了许多未知的模型参数; $c_d(X)$ 是现存的确定性模型,即学者们总结归纳的氯离子扩散系数模型; $\gamma(X, \theta)$ 是现有模型的误差修正项; ε 是零均值和单位方差的普通随机变量; σ 是未知模型参数,即误差修正后仍存在的模型偏差.上述公式的成立需满足两个假设:(1)“同方差”假设,模型偏差值 σ 的变化与输入参数 X 的大小无关;(2) ε 是服从标准正态分布的变量.

最初的 $\gamma(X, \theta)$ 形式是在已有的氯离子扩散系数模型 $c_d(X)$ 的基础上进行误差修正,由于先验模型(现存的氯离子扩散系数模型)通常包含许多近似值,故 $\gamma(X, \theta)$ 的形式并不确定.为了探究先验模型的偏差来源,我们选用一系列合适的概率 p 来解释误差效果 $h_i(X)$, $i=1, \dots, p$, 并且针对已有氯离子扩散系数的误差修正项可表示为

$$\gamma(X, \theta) = \sum_{i=1}^p \theta_i h_i(X) \quad (5)$$

通过审核未知参数 θ_i 的先验统计,我们可以确定该误差修正项在描述现有的氯离子扩散系数模型的偏差方面是有意义.虽然误差修正项中的参数 θ_i 是线性的,但基础变量 X 没有必要也是线性的.

为满足“同方差”假设,同时考虑到氯离子扩散系数的非负性,选择对数方差稳定变换来构造氯离子扩散模型^[7]:

$$\ln[C(X, \Theta)] = \ln[c_d(X)] + \sum_{i=1}^p \theta_i h_i(X) + \varepsilon \quad (6)$$

用贝叶斯参数估计法确定未知参数 $\Theta = (\theta, \sigma)$, 这

些参数使公式(4)、(6)中的氯离子扩散系数模型更好地贴合试验结果. 在贝叶斯方法中, 先验分布代表基于主观信息的不确定参数, 并且会根据客观信息(如氯离子扩散系数试验数据)更新为后验分布^[8]. 这个过程可以表示为

$$f(\theta) = kL(\theta)p(\theta) \quad (7)$$

式中: $p(\theta)$ 是先验分布, $f(\theta)$ 是后验分布, $L(\theta)$ 则是表示氯离子扩散系数试验结果的似然函数, $k = \left[\int L(\theta)p(\theta)d(\theta) \right]^{-1}$ 是正则化因子. 必须说明的是, 后验分布不依赖于先验分布的选取, 也就是建立氯离子扩散系数模型的过程中, 后验模型不会因先验模型的选择不同而不同. 因此, 在无先验信息时可采用如下模型:

$$\ln[C(X, \theta)] = \sum_{i=1}^p \theta_i h_i(X) + \alpha \quad (8)$$

虽然该公式有很大局限性, 但在其中可任意添加不同因素来满足不同研究的需要.

3 氯离子扩散系数计算模型的建立

3.1 试验数据

混凝土内外氯离子浓度差是氯离子扩散的主要动力, 混凝土表面氯离子浓度越高, 内外离子浓度梯度越大, 扩散至混凝土内的氯离子越多. 混凝土表面氯离子浓度与环境中氯离子浓度有关, 还与材料本身的孔隙率有关. 影响氯离子侵蚀的因素有很多, 主要可分为以下三个方面: 材料性质(如混凝土水胶比)、环境因素、时间.

一般来说, 在标准的养护条件下, 相同的养护龄期和配合比的混凝土氯离子扩散系数随水胶

比的增大而增大, 而混凝土水胶比越大, 其孔隙率越大, 孔隙水含量越多, 氯离子随孔隙水扩散至混凝土内, 与混凝土内材料发生物理化学作用, 导致结构耐久性损伤也越大. 环境温度升高, 氯离子活动能量增加, 自由氯离子数量增多, 导致氯离子扩散速度加快. 氯离子在混凝土中的传输需要孔隙水作为载体, 随自由水进入混凝土中, 当相对湿度增加, 混凝土含水量增加, 氯离子进入混凝土的速度加快. 随养护龄期的增加, 水泥水化程度增加, 水化产物不断填充混凝土的孔隙, 混凝土结构孔隙率降低, 孔隙水减少, 氯离子的扩散速度减慢^[9]. 因此, 氯离子扩散模型中考虑的影响因素可归纳为表1. 目前, 学者们对氯离子扩散做了大量研究, 由于试验研究方法和条件的不同, 不方便集中整合, 本文为方便比较, 选取具有相同养护龄期天数的试验作为氯离子扩散系数计算模型的先验信息, 具体的试验参数见参考文献^[10-17], 对搜集到的55组试验数据按照表1中所列因素进行归纳整理, 结果见表2.

表1 选定的氯离子影响因素

Tab. 1 Selected parameters

影响因素	符号
水胶比	W/B
参考时间与侵蚀持续时间之比	t_0/t
环境温度与养护时标准温度值之比	T/T_0
混凝土相对湿度与临界相对湿度之比	h/h_c

注: 表中参考时间 t_0 一般取 28 d, 环境温度 T_0 取 20 °C, 临界相对湿度 h_c 一般取 75%.

表2 选定因素的试验数据库

Tab. 2 Test database of selected parameters

参考文献	试件编号	W/B	t/d	$T/^\circ\text{C}$	$H/\%$	t_0/t	T/T_0	h/h_c	$D/(10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
王建民(2013) ^[10]	1	0.31	90	35	90	0.31	1.75	1.2	6.75
			120	35	90	0.23	1.75	1.2	5.89
			150	35	90	0.187	1.75	1.2	5.29
杨进波(2007) ^[11]	A	0.35	28	20	90	1	1	1.2	8.05
			60	20	90	0.47	1	1.2	5.73
			90	20	90	0.31	1	1.2	4.50
	B	0.4	28	20	90	1	1	1.2	10.36
			60	20	90	0.47	1	1.2	6.68
			90	20	90	0.31	1	1.2	5.18

续表 2

参考文献	试件编号	W/B	t/d	$T/^\circ\text{C}$	$H/\%$	t_0/t	T/T_0	h/h_c	$D/(10^{-8}\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$
杨进波(2007) ^[11]	C	0.45	28	20	90	1	1	1.2	12.95
			60	20	90	0.47	1	1.2	7.91
			90	20	90	0.31	1	1.2	6.41
	D	0.5	28	20	90	1	1	1.2	16.64
			60	20	90	0.47	1	1.2	9.41
			90	20	90	0.31	1	1.2	7.77
	E	0.55	28	20	90	1	1	1.2	21
			60	20	90	0.47	1	1.2	11.18
			90	20	90	0.3	1	1.2	9.41
	F	0.6	28	20	90	1	1	1.2	26.32
			60	20	90	0.47	1	1.2	13.23
			90	20	90	0.31	1	1.2	11.32
彭建新(2014) ^[12]	C1	0.4	30	25	95	0.93	1.25	1.27	0.32
	C2	0.5	30	25	95	0.93	1.25	1.27	0.48
	C3	0.6	30	25	95	0.93	1.25	1.27	0.56
傅巧瑛(2016) ^[13]	A0	0.35	28	37	90	1	1.85	1.2	9.94
	B0	0.41	28	37	90	1	1.85	1.2	12.97
赵卓(2013) ^[14]	C20	0.46	28	20	65	1	1	0.87	17.7
			60	20	65	0.47	1	0.87	7.45
			90	20	65	0.31	1	0.87	4.78
	C30	0.42	28	20	65	1	1	0.87	6.57
			60	20	65	0.47	1	0.87	4.05
			90	20	65	0.31	1	0.87	2.48
	C40	0.39	28	20	65	1	1	0.87	6.99
			60	20	65	0.47	1	0.87	3.14
			90	20	65	0.31	1	0.87	1.68
	C50	0.35	28	20	65	1	1	0.87	6.82
			60	20	65	0.47	1	0.87	2.35
			90	20	65	0.31	1	0.87	2.11
叶铭勋(1986) ^[15]	A	0.25	120	20	65	0.23	1	0.87	0.41
	B	0.3	120	20	65	0.23	1	0.87	0.76
	C	0.35	120	20	65	0.23	1	0.87	1
	I	0.3	100	20	65	0.28	1	0.87	0.9
Pinhai Gao(2017) ^[16]	C0	0.36	28	20	65	1	1	0.87	10.28

续表 2

参考文献	试件编号	W/B	t/d	T/℃	H/%	t_0/t	T/T_0	h/h_c	$D/(10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
Jian-Jun Zheng(2018) ^[17]	1		60	20	95	0.47	1	0.87	1.78
	2	0.3	120	20	95	0.23	1	0.87	1.49
	3		200	20	95	0.14	1	0.87	1.2
	4		60	20	95	0.47	1	0.87	4.95
	5	0.4	120	20	95	0.23	1	0.87	4.15
	5		200	20	95	0.14	1	0.87	3.66
	7		60	20	95	0.47	1	0.87	8.21
	8	0.5	120	20	95	0.23	1	0.87	7.32
	9		200	20	95	0.14	1	0.87	6.83
	10		60	20	95	0.47	1	0.87	12.27
	11	0.6	120	20	95	0.23	1	0.87	11.08
	12		200	20	95	0.14	1	0.87	10.19

3.2 氯离子扩散系数计算模型的建立

将表 2 中搜集到的有关氯离子扩散系数的试验数据作为先验信息, 利用不需要先验模型的公式(8), 根据现有研究成果的统计结果以及模型的试算结果, 选取 $h_1(x) = \ln 2$ 为修正常数项, 使该模型更好地预测普通混凝土中氯离子的传输; 根据理论分析和经验确定各个影响因子的偏差修正项分别为: $h_2(x) = \ln(W/B)$, $h_3(x) = \ln(t_0/t)$, $h_4(x) = \ln(T/T_0)$, $h_5(x) = \ln(h/h_c)$. 在公式(8)中, $\theta_i (i=1, \dots, 5)$ 即为待求解的五个参数; $x_i (i=1, \dots, 5)$ 是氯离子侵蚀的主要影响因素, 分别为经验修正因子、混凝土水胶比、参考时间与侵蚀时间之比、环境温度与养护标准温度之比、混凝土相对湿度与临界相对湿度之比等五个因素. 为了简化计算过程, 采用取自然对数的方法, 将多因子连乘转化为多因式相加, 利用数学分析计算软件对搜集到的试验数据(先验信息)进行非线性回归分析, 得到氯离子扩散系数计算模型. 即依据表 2 中氯离子扩散的先验信息, 选用公式(8)作为氯离子侵蚀的基础公式形式, 进行贝叶斯参数估计, 得到氯离子扩散系数计算模型:

$$D = 27.41 \left(\frac{W}{B} \right)^{1.599} \left(\frac{t_0}{t} \right)^{1.059} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0.777} \left(\frac{h}{h_c} \right)^{-2.511} \quad (9)$$

上述公式的混凝土水胶比、参考时间与侵蚀持续时间之比、环境温度与养护标准温度之比、混凝土相对湿度与临界相对湿度之比等四个因素, 是选定的表征氯离子侵蚀的主要影响因素(见表 1). 在上述公式(9)中, 没有表现出氯离子侵蚀的后验分布

所产生的偏差波动项 $\varepsilon\sigma$, 其中 ε 是服从标准正态分布的随机变量参数, σ 可由模型计算得到 $\sigma = 0.097$.

4 模型的验证

考虑到现有氯离子扩散模型难以精确描述氯离子的侵蚀过程, 为了能够对上述模型进行实用性评价, 采用随机取样的数学统计方法, 随机选取有关氯离子扩散系数的试验数据, 与模型计算结果进行比较, 比较结果见表 3. 从表中可以看出, 计算结果与试验结果总体吻合良好, 但仍有少量偏差, 导致计算结果偏差的原因主要有试验方面的误差和模型计算时四舍五入产生的误差, 以及在综合考虑氯离子扩散系数影响因素时的整合误差, 如没有考虑掺和料的添加和种类对混凝土孔隙结构的影响等.

目前, 多位学者研究了氯离子侵蚀现象并建立了不同形式的氯离子扩散模型, 这些模型主要是基于 Fick's 第二定律并考虑各影响因素修正得到的不同扩散深度的氯离子浓度计算模型, 1999 年 Tohmas 考虑氯离子扩散系数的时间依赖性, 给出了氯离子扩散系数随时间的变化变化关系^[18].

$$D = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (10)$$

式中, D_0 和 D 分别为扩散时间为 t_0 和 t 时混凝土的氯离子扩散系数, m 为时间依赖性常数, 对普通混凝土可取 $m = 3 \cdot (0.55 - w/c)$. 将 Tohmas 的氯离子扩散系数计算模型与公式(9)进行对比, 结果如下图 1 所示, 从图 1 可以看出公式(9)的计算结果与张立明^[19]的试验结果更为吻合, 体现了

贝叶斯方法的准确性.

表 3 试验结果与模型结果对比
Tab. 3 The comparison of test and model result

参考文献	试件编号	W/B	t_0/t	T/T0	h/hc	试验值 D	计算值 D'	ΔD
张立明(2018) ^[19]	C30	0.53	0.31	1	0.87	4.27	4.08	-0.19
	C50	0.35	0.31	1	0.87	1.79	2.10	0.31
	C30	0.53	0.1	1	0.87	2	1.23	-0.77
	C50	0.35	0.1	1	0.87	0.81	0.63	-0.18
	C30	0.53	0.06	1	0.87	0.98	0.72	-0.26
	C50	0.35	0.06	1	0.87	0.56	0.37	-0.19
	C30	0.53	0.04	1	0.87	0.56	0.47	-0.09
	C50	0.35	0.04	1	0.87	0.13	0.24	0.11

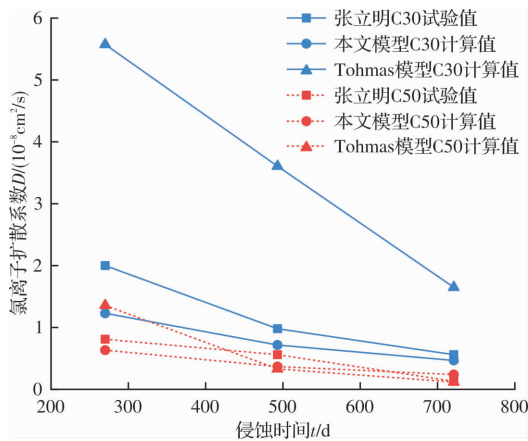


图 1 试验值与两个模型计算值的对比
Fig. 1 Comparison between experimental results and calculation results

5 结论

(1)基于贝叶斯理论建立的氯离子扩散系数模型计算结果与试验结果较接近,很好地利用了前面学者的研究经验和试验数据,得到了具有广泛应用意义的氯离子扩散系数计算公式.

(2)本文基于贝叶斯理论建立的氯离子扩散系数计算公式,综合考虑了混凝土水胶比、环境的温湿度以及氯离子侵蚀过程的时间依赖性,计算结果与试验结果吻合比较好,其比值较为稳定,均值为 1.11. 故可以用该模型对氯离子侵蚀现象进行预测.

(3)由于条件的限制,本文搜集的数据有限,为了让模型能更准确地预测氯离子侵蚀规律,更多模型先验信息还有待完善.

参考文献 References

[1] 张誉, 蒋利学, 张伟平, 等. 混凝土结构耐久性概论

[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2003.

ZHANG Yu, JIANG Lixue, ZHANG Weiping, et al. Durability of concrete structures[M]. Shanghai: Scientific & Technical Publishers, 2003.

[2] 滕海文, 舒正昌, 黄颖, 等. 多因素作用下钢筋混凝土构件氯离子扩散系数模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(1):12-16.

TENG Haiwen, SHU Zhengchang, HUANG Ying, et al. Chloride ion diffusion coefficient model of R. C. elements under multiple factors[J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(1):12-16.

[3] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京:科学出版社, 2002

JIN Weiliang, ZHAO Yuxi. Durability of concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2002.

[4] 余红发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 混凝土使用寿命预测方法的研究 I——理论模型[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(6):686-690.

YU Hongfa, SUN Wei, YAN Lianghui, et al. Study on prediction of concrete service life I: Theoretical model[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002, 30(6):686-690.

[5] 孙丛涛, 牛荻涛. 混凝土中氯离子扩散性能的深入探讨[J]. 工业建筑, 2010, 40(9):80-83.

SUN Congtao, NIU Diutao. Further study on chloride ion diffusion properties in concrete[J]. Industrial Construction, 2010, 40(9):80-83.

[6] 茆诗松. 贝叶斯统计[M]. 北京:中国统计出版社, 1999.

MAO Shisong. Bayesian statistics[M]. Beijing: Chinese Statistics Press, 1999.

[7] GARDONI Paolo, DER KIUREGHIAN A, MOSALAM K M. Probabilistic capacity models and fragility estimates

- for reinforced concrete columns based on experimental observations[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 128.10 (2002): 1024-1038.
- [8] 张尧庭. 贝叶斯统计推断[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
ZHANG Raoting. Bayesian statistical inference theory [M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [9] 施养杭, 罗刚. 含多种因素的氯离子侵入混凝土的有限差分计算模型[J]. *工业建筑*, 2004, 34(5): 7-10.
SHI Yanghang, LUO Gang. A finite calculating model of chloride penetrating into concrete under various factors[J]. *Industrial Construction*, 2004, 34(5): 7-10.
- [10] 王建民, 刘冠国, 雷笑, 等. 盐雾环境下混凝土抗氯离子性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2013, 43(11): 89-91.
WANG Jianming, LIU Guanguo, LEI Xiao, et al. Experimental study on the anti-chloride ion performance of concrete in salt spray environment [J]. *Industrial Construction*, 2013, 43(11): 89-91.
- [11] 杨进波, Folker, WITTMANN H, et al. 混凝土氯离子扩散系数试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2007, 10(2): 223-229.
YANG Jinbo, Folker, WITTMANN H, et al. Experimental research of chloride diffusion coefficient in concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2007, 10(2): 223-229.
- [12] 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 Jianxin, WANG Hua, ZHANG Jianren, et al. Experimental study on 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.
- [13] 傅巧瑛, 刘荣桂, 延永东, 等. 水灰比和应力水平对混凝土中氯离子传输的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(8): 2378-2382.
FU Qiaoying, LIU Ronggui, YAN Yongdong, et al. Effect of water-cement ratio and stress level on chloride ion transmission in concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(8): 2378-2382.
- [14] 赵卓, 李整建, 申磊, 等. 混凝土原材料及力学性能与氯离子扩散系数间的相关性试验研究[J]. *混凝土*, 2013(8): 72-75.
ZHAO Zhuo, LI Zhengjian, SHEN Lei, et al. Correlation test between chloride diffusion coefficient and raw material and mechanical properties[J]. *Concrete*, 2013(8): 72-75.
- [15] 叶铭勋, 胡竹魂. 氯离子扩散系数的测定[J]. *水利水电工程学报*, 1986(4): 79-84.
YE Mingxun, HU Zhuhun. Determination of chloride ion diffusion coefficient[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2013(8): 72-75.
- [16] GAO Pinhai, WEI Jiangxiong, ZHANG Tongsheng, et al. Modification of chloride diffusion coefficient of concrete based on the electrical conductivity of pore solution[J]. *Construction and Building Materials*. 2017. 145: 361-366.
- [17] ZHENG Jianjun, ZHANG Jian, ZHOU Xinzhong, et al. A three-step analytical scheme for estimating the steady-state chloride diffusion coefficient of mature cement paste[J]. *Construction and Building Materials*, 2018. 191: 1004-1010.
- [18] MICHAEL D A Thomas, PHIL B Bamforth. Modeling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(4): 487-495.
- [19] 张立明, 余红发. 基于室内外相关性方法的混凝土氯离子扩散性研究[J]. *浙江建筑*, 2018(2): 46-49.
ZHANG Liming, YU Hongfa. Study on the application of bim technology on the management of precast unit production[J]. *Zhejiang Construction*, 2018(2): 46-49.

(编辑 沈 波)