

Transport Model and Life Prediction of Chloride in Concrete under Hot and Humid Environment

Kunpu Zhao, Zongmin Liu, Jize Mao

College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang
Email: zkptmgc@163.com

Received: Jun. 20th, 2016; accepted: Jul. 5th, 2016; published: Jul. 13th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The concrete structure in the South Sea and the south areas of East Sea is in a high temperature, high humidity and high salinity corrosion environment, which seriously damages the service life of the structure. The transport model of chloride is established based on Fick's second law under hot and humid coupling environment. The service life of concrete structure is calculated by using the critical chloride concentration and corrosion width of the steel bar as the evaluation index. The durability life of a cross-sea bridge is predicted in this paper. The results show that the transport model of chloride under the humid hot and humid coupling environment can provide a useful reference for the durable life prediction of the concrete structure.

Keywords

Hot and Humid Environment, Transport Model, Life Prediction

湿热环境下混凝土氯离子的运输模型研究及寿命预测

赵昆璞, 刘宗民, 毛继泽

哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨
Email: zkptmgc@163.com

收稿日期: 2016年6月20日; 录用日期: 2016年7月5日; 发布日期: 2016年7月13日

文章引用: 赵昆璞, 刘宗民, 毛继泽. 湿热环境下混凝土氯离子的运输模型研究及寿命预测[J]. 土木工程, 2016, 5(4): 116-124. <http://dx.doi.org/10.12677/hjce.2016.54016>

摘要

我国南海和东海南部地区混凝土结构，常年处于高温、高湿、高盐度的腐蚀环境下，严重地损害了结构的使用寿命。本文在非克第二定律的基础上，建立了湿热耦合环境下氯离子的输运模型；采用临界氯离子浓度和钢筋锈蚀宽度作为寿命评估指标，计算了混凝土结构的使用寿命。本文对某跨海大桥的耐久性寿命进行了具体的预测。结果表明：本文建立的湿热耦合环境下氯离子的输运模型可以为相关环境下的混凝土结构耐久性寿命预测提供有益的参考。

关键词

湿热环境，输运模型，寿命预测

1. 引言

混凝土中钢筋的腐蚀破坏已被确认为钢筋混凝土耐久性降低的首要因素。氯盐侵蚀引起的钢筋耐久性问题在我国十分的普遍[1]。北方寒冷地区混凝土结构受到氯离子和冻融循环等因素的影响；南方混凝土结构区受到氯离子、温度、湿度等因素的作用，特别是南海和东海南部地区混凝土结构，常年处于高温、高湿、高盐度的腐蚀环境下，对结构的耐久性造成了十分不利的影

2. 模型建立

Fick 第二定律将混凝土表面氯离子浓度、扩散系数与扩散时间联系起来，得到其传质过程中的数学模型[2]：

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中， t 为氯盐侵蚀时间， x 为距混凝土表面的距离， D 为氯离子扩散系数； c 是距混凝土表面 x 处的氯离子浓度。

研究表明：混凝土中氯离子的扩散系数是一个与时间有关的变量，并且随着时间的增加而减小，将氯离子的扩散系数随时间增加而降低的现象用幂函数表示[3]：

$$D = D_0(t_0) \cdot (t_0/t)^a \quad (2)$$

式中， $D_0(t_0)$ 为 t_0 时刻混凝土中氯离子的扩散系数， t_0 为参考时间， a 为经验系数。

基于文献[4]研究成果，氯离子扩散系数与混凝土相对湿度的关系：

$$D(RH) = D_0 \cdot \left[1 + \frac{(1-RH)^4}{(1-0.75)^4} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中， $D(RH)$ 为相对湿度下的扩散系数， D_0 为饱和状态下的扩散系数， RH 混凝土相对湿度。

试验研究和工程调查表明，环境温度对混凝土中氯离子的输运有着直接的影响。温度修正系数 k ，如表 1 所示[5]。

表 1 中的温度是工程所处环境的平均温度。应用插值法求得表 1 中未给出的温度修正系数。当温度小于 5°C 时刻按 5°C 计，当温度大于 35°C 式以 35°C 计。由表 1 可知，文献[5]指出当工程所处环境温度大于 20°C 时，温度对氯离子的输运起到了促进作用；当工程所处环境温度小于 20°C 时，温度对氯离子的输运起到了削弱作用。

假设对于某项工程而言，所处 t_i 时间段内的平均温度为 K_i (i 取 1~8)。

其中， $0^\circ\text{C} \leq K_1 < 5^\circ\text{C}$ ； $5^\circ\text{C} \leq K_2 < 10^\circ\text{C}$ ； $10^\circ\text{C} \leq K_3 < 15^\circ\text{C}$ ； $15^\circ\text{C} \leq K_4 < 20^\circ\text{C}$ ； $20^\circ\text{C} \leq K_5 < 25^\circ\text{C}$ ；

Table 1. Temperature correction coefficients

表 1. 温度修正系数

温度(°C)	5	10	15	20	25	30	35
k	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.6	2

$25^{\circ}\text{C} \leq K_6 < 30^{\circ}\text{C}$; $30^{\circ}\text{C} \leq K_7 < 35^{\circ}\text{C}$; $K_8 \geq 35^{\circ}\text{C}$ 。

则温度因素对氯离子扩散的影响系数 f_3 :

$$f_3 = \frac{1}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8} \left\{ k_1 t_1 + \left[k_1 + \frac{(k_2 - k_1)}{5} \right] t_2 + \left[k_2 + \frac{(k_3 - k_2)}{5} \right] t_3 + \left[k_3 + \frac{(k_4 - k_3)}{5} \right] t_4 + \left[k_4 + \frac{(k_5 - k_4)}{5} \right] t_5 + \left[k_5 + \frac{(k_6 - k_5)}{5} \right] t_6 + \left[k_6 + \frac{(k_7 - k_6)}{5} \right] t_7 + k_7 t_8 \right\} \quad (4)$$

$$= \frac{1}{\sum_{i=1}^{n=8} t_i} \left\{ k_1 t_1 + \sum_{i=1}^{n=6} \left(\frac{4k_i + k_{i+1}}{5} \right) t_i + k_7 t_8 \right\}$$

式中, $k_1 = 0.5$; $k_2 = 0.6$; $k_3 = 0.8$; $k_4 = 1.0$; $k_5 = 1.2$; $k_6 = 1.6$; $k_7 = 2.0$ 。

综合以上因素, 可得湿热环境下混凝土内氯离子侵蚀模型:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$D_{eff} = f_1 f_2 f_3 D_0 \quad (6)$$

式中, f_1 为时变因素对氯离子扩散的影响系数, $f_1 = (t_0/t)^a$; f_2 为环境湿度对氯离子扩散的影响系数, $f_2 = \left[1 + (1 - RH)^4 / (1 - 0.75)^4 \right]^{-1}$; f_3 为温度因素对氯离子扩散的影响系数。

3. 混凝土结构耐久性寿命评估

混凝土结构在服役的过程中, 存在 3 个关键的特征时间段[6]: 混凝土结构建成到混凝土内钢筋开始锈蚀的时间段(去钝化) T_1 ; 钢筋钝化膜破坏至钢筋锈胀引起混凝土保护层开裂的时间段 T_2 ; 混凝土保护层开裂至裂缝宽度发展到 1 mm 所需的时间段 T_3 。

文献表明[7], 钢筋的锈蚀速度与锈蚀电流有密切的关系。同时, 文献[8]中指出当混凝土中氯离子浓度小于 0.4% 时(混凝土中的临界氯离子浓度一般都小于 0.4%), 其腐蚀电流变化较小, 因此可以近似考虑 T_2 和 T_3 时间段钢筋的锈蚀均以均匀速度进行的。

T_2 时间段以后, 由于保护层开裂, 会导致氧气和水分进入混凝土的速率明显加大, 因此 T_3 时间段钢筋的锈蚀速度应大于 T_2 时间段钢筋的锈蚀速度。混凝土结构使用寿命全过程如图 1 所示。

由图 1 所示, 混凝土结构耐久性寿命 T 为:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (7)$$

式中: T_1 为钢筋表面去钝化所需时间; T_2 钢筋开始锈蚀至保护层开裂所需时间; T_3 保护层开裂至裂缝宽度发展到 1 mm 所需时间。

3.1. 钢筋表面去钝化所需时间 T_1

钢筋表面去钝化所需时间 T_1 取决于氯离子在混凝土中运输, 这个过程可以用菲克第二定律描述:

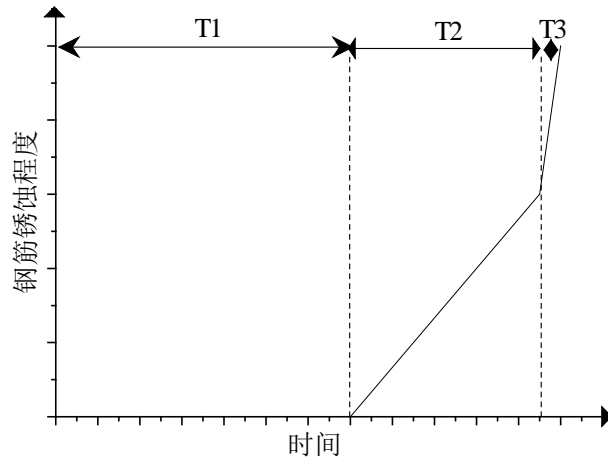


Figure 1. The whole life process of concrete structure
图 1. 混凝土结构的全寿命过程

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (8)$$

式中, c 为经时间 t 后距表面 x 处氯离子的浓度; D 为氯离子扩散系数; x 为距混凝土表面的深度; t 为扩散时间。

一维状态下, 其解析解为:

$$c(x, t) = c_0 + (c_s - c_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (9)$$

式中, c_0 为混凝土内部初始浓度, c_s 为混凝土表面氯离子浓度, $\operatorname{erf}(x)$ 为误差函数。

假设钢筋混凝土结构的保护层厚度为 C , 氯离子的临界浓度为 c_r , 可以推导出 T_1 :

$$T_1 = t = \left[\frac{C}{2\sqrt{D} \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{c_s - c_r}{c_s - c_0} \right)} \right]^2 \quad (10)$$

由于 f_1 、 f_2 、 f_3 均与 x 无关, 将式(2)、(3)、(4), 代入式(8):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \left\{ \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^{n=8} t_i} \left[k_1 t_1 + \sum_{i=1}^{n=6} \left(\frac{4k_i + k_{i+1}}{5} \right) + k_7 t_8 \right] \cdot \left[1 + \frac{(1-RH)^4}{(1-0.75)^4} \right]^{-1} \cdot D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \right\} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (11)$$

令:

$$\partial T = \left\{ \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^{n=8} t_i} \left[k_1 t_1 + \sum_{i=1}^{n=6} \left(\frac{4k_i + k_{i+1}}{5} \right) + k_7 t_8 \right] \cdot \left[1 + \frac{(1-RH)^4}{(1-0.75)^4} \right]^{-1} \cdot D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \right\} \partial t \quad (12)$$

则式(11)可以写为:

$$\frac{\partial c}{\partial T} = \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (13)$$

参考(10)式, 其一维状态下的解析解为:

$$c(x, T) = c_0 + (c_s - c_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{T}} \right) \right] \quad (14)$$

$$T = \int_0^t \left\{ \left[1 + \frac{(1-RH)^4}{(1-0.75)^4} \right]^{-1} \cdot D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \cdot \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^{n=8} t_i} \left[k_1 t_1 + \sum_{i=1}^{n=6} \left(\frac{4k_i + k_{i+1}}{5} \right) + k_7 t_8 \right] \right] \right\} dt \quad (15)$$

$$= \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^{n=8} t_i} \left[k_1 t_1 + \sum_{i=1}^{n=6} \left(\frac{4k_i + k_{i+1}}{5} \right) + k_7 t_8 \right] \right] \cdot \left[1 + \frac{(1-RH)^4}{(1-0.75)^4} \right]^{-1} \cdot \frac{D_0 t_0^\alpha}{1-\alpha}$$

则温度和荷载耦合作用下, 钢筋表面去钝化时间 T_1 为:

$$T_1 = \left[\frac{C}{2 \left[\sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{n=8} t_i} \left[k_1 t_1 + \sum_{i=1}^{n=6} \left(\frac{4k_i + k_{i+1}}{5} \right) + k_7 t_8 \right]} \cdot \sqrt{\left[1 + \frac{(1-RH)^4}{(1-0.75)^4} \right]^{-1} \cdot \frac{D_0 t_0^\alpha}{1-\alpha} \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{c_s - c_r}{c_s - c_0} \right)} \right]} \right]^{\frac{2}{1-\alpha}} \quad (16)$$

由图 1 可知, 计算钢筋开始锈蚀至保护层开裂时间 T_2 以及保护层开裂至裂缝宽度发展到 1 mm 所需时间 T_3 , 最直接的方式是通过计算钢筋锈蚀程度发展所需时间确定的。本文计算中采用钢筋的锈蚀深度这一变量来说明钢筋的破坏程度, 从而确定钢筋混凝土使用寿命全过程的 T_2 和 T_3 。

3.2. 钢筋开始锈蚀至保护层开裂时间 T_2

由文献[9]可知, 保护层开裂前钢筋的锈蚀速度:

$$\lambda_1 = 46k_{cr}k_{ce}e^{0.04F} (RH - 0.45)^{\frac{2}{3}} C^{-1.36} f_{cu}^{-1.83} \quad (17)$$

式中, λ_1 为保护层开裂前钢筋的锈蚀速度, k_{cr} 为钢筋位置的修正系数, k_{ce} 小环境条件修正系数, F 环境温度, RH 环境湿度, C 混凝土保护层厚度, f_{cu} 混凝土立方体抗压强度。

Rodriguez [10]通过电化学锈蚀试验和长期暴露试验研究了混凝土保护层开裂时钢筋的锈蚀深度, 给出了计算公式:

$$\delta_{cr} = \left(83.8 + 7.4 \frac{C}{d} - 22.6 f_t \right) \times 10^{-3} \quad (18)$$

式中, δ_{cr} 混凝土保护层开裂时钢筋的锈蚀深度; d 为钢筋的直径; f_t 为混凝土的抗拉强度。

则钢筋开始锈蚀至保护层开裂时间 T_2

$$T_2 = \frac{\delta_{cr}}{\lambda_1} \quad (19)$$

3.3. 混凝土保护层开裂至裂缝宽度发展到 1 mm 所需的时间段 T_3

混凝土内部出现裂缝是由于钢筋锈蚀膨胀产生的膨胀压力大于混凝土的抗拉强度所引起的。内部裂缝出现后, 会进一步扩张到混凝土表面, 从而导致保护层开裂。因此钢筋的锈蚀程度与裂缝宽度存在一定的关系, Reodriguez [10]通过试验给出了裂缝宽度与钢筋锈蚀深度的关系为:

$$w = 0.05 + 12.5(\delta - \delta_{cr}) \quad (20)$$

即

$$\delta = \delta_{cr} + \frac{w - 0.05}{12.5} \quad (21)$$

式中, w 为保护层裂缝宽度, δ 为钢筋锈蚀深度。

混凝土保护层开裂至裂缝宽度发展到 1 mm 时间段内, 钢筋的锈蚀速度[6]为:

$$\lambda_2 = 0.0116i_{cor} \quad (22)$$

式中, λ_2 为保护层开裂至裂缝宽度发展到 1 mm 时间段内钢筋的锈蚀速度, i_{cor} 平均锈蚀电流。

由文献[7]可知:

$$i_{cor} = \frac{37.8(1 - w/c)^{-1.64}}{C} \quad (23)$$

式中, w/c 为水灰比。

因此, 混凝土保护层开裂至裂缝宽度发展到 1 mm 所需时间 T_3 为:

$$T_3 = \frac{\delta - \delta_{cr}}{\lambda_2} \quad (24)$$

4. 工程实例

南海与东海过渡海域的某跨海大桥, 跨海大桥工程路线全长 26.676 km, 其中跨海桥梁部分约 12.455 km, 工程结构材料主要采用钢筋混凝土, 其设计使用年限为 100 年。

主要工程特点如下:

1) 耐高温腐蚀: 跨海大桥建设地属亚热带海洋性季风气候, 气温高, 离子的活动能力较强, 腐蚀介质渗透速率快。

2) 抗氯盐侵蚀:

跨海大桥所处的海域, 海水中氯离子含量 23.6 g/L。大桥箱梁处于大气区, 会受到盐雾和除冰盐的作用。大桥的承台处于浪溅区, 会经常受到海水中氯盐的侵蚀。

3) 强度要求

结构体系中主要的受力构件为箱梁和承台。箱梁是由 C50 的混凝土配制而成。主要用于承受弯曲应力。大桥承台主要承受压应力作用。

跨海大桥所处区域的月份平均温度如图 2 所示。

计算参数如表 2 所示。

计算的过程中分别采用氯离子与氢氧根浓度的比值 Cl/OH 和总氯离子占水泥或混凝土重量百分比这两种形式作为临界氯离子浓度。

以氯离子与氢氧根浓度的比值 Cl/OH 作为临界氯离子浓度的寿命预测结果

工程中, 通常采用下列式子作为判断钢筋脱钝的临界条件[11]:

$$[Cl^-]/[OH^-] = 0.6 \quad (25)$$

式中, 混凝土中氢氧根的浓度主要取决于氧化钾、氧化钠的含量, 可由下式进行计算:

$$[OH^-] = G \times [(Na_2O)/31 + (K_2O)/47] \quad (26)$$

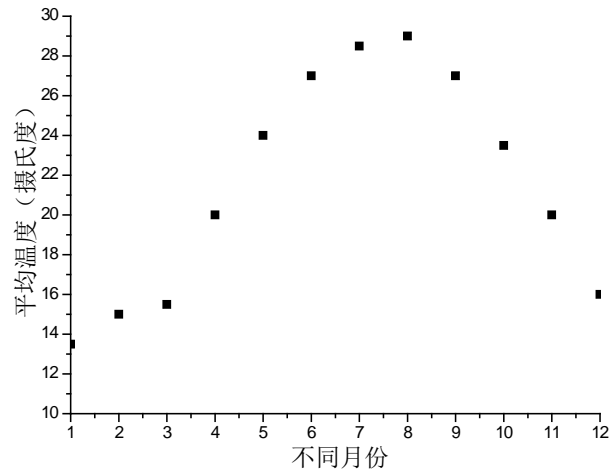


Figure 2. The average temperature of months in a year
图 2. 全年月份平均温度

Table 2. Calculating parameters

表 2. 计算参数

参数	值
相对湿 RH	80%
箱梁保护层厚度 C_1	50 mm
承台保护层厚度 C_2	75 mm
水灰比 w/c	0.35
箱梁混凝土等级	C50
承台混凝土等级	C35
钢筋直径 d	25 mm
经验系数 α	0.5
小环境条件修正系数 k_{ce}	3.5
钢筋位置修正系数 k_{cr}	1
箱梁混凝土表面氯离子浓度 c_{s1}	0.5%
承台混凝土表面氯离子浓度 c_{s2}	1.15%
混凝土内部初始氯离子浓度 c_0	0

式中 G 为每立方米混凝土中的胶凝材料用量。

具体预测结果如表 3 所示。

以总氯离子占水泥或混凝土重量百分比作为临界氯离子浓度的寿命预测结果

根据文献[12]，采用 $c_r = 0.154\%$ 作为临界氯离子浓度，构件耐久性寿命预测结果如表 4 所示。

从表 3 和表 4 可以看出：

1) 以氯离子和氢氧根离子的比值作为临界氯离子浓度进行寿命预测，跨海大桥承台和主梁寿命预测值分别为 139.62 年和 101.96 年；以总氯离子占混凝土或水泥重量百分比作为临界氯离子浓度进行寿命预测，跨海大桥承台和主梁寿命预测值分别为 152.92 年和 125.80 年，均满足大桥设计基准期 100 年的耐久性要求。

Table 3. The durability life prediction results 1 of components
表 3. 构件耐久性寿命预测结果 1

构件名	T_1 (年)	T_2 (年)	T_3 (年)	T (年)
承台	84.50	48.72	6.40	139.62
箱梁	72.60	25.07	4.29	101.96

Table 4. The durability life prediction results 2 of components
表 4. 构件耐久性寿命预测结果 2

构件名	T_1 (年)	T_2 (年)	T_3 (年)	T (年)
承台	97.80	48.72	6.40	152.92
箱梁	96.44	25.07	4.29	125.80

2) 钢筋表面去钝化所需时间 T_1 和钢筋开始锈蚀至保护层开裂所需时间 T_2 对混凝土结构耐久性寿命 T 的预测起控制作用。这是因为保护层一旦开裂, 会导致氧气和水分进入混凝土的速率明显加大, 为钢筋的锈蚀提供了有利的条件, 使钢筋的锈蚀速度迅速增加, 从而导致结构的寿命大大降低。

3) 临界氯离子浓度对结构的寿命预测有着重要的影响。这主要是因为, 临界氯离子浓度的选取, 直接影响钢筋表面去钝化所需时间 T_1 的计算结果。

4) 从本算例的计算结果可以看出, 以氯离子和氢氧根离子的比值作为临界氯离子浓度, 比用总氯离子占混凝土或水泥重量百分比作为临界氯离子浓度进行结构的寿命预测, 有着更好的安全储备。这是因为以氯离子和氢氧根离子的比值作为临界氯离子浓度进行寿命预测, 考虑了混凝土内部 PH 值的变化对钢筋锈蚀的影响。随着内部钢筋的锈蚀, 混凝土内部的 PH 值是不断降低的, 氢氧根对氯离子的抑制作用也不断的减弱, 从而在一定程度上也加速了钢筋的锈蚀。

5. 结论

本文首先建立了湿热耦合环境下氯离子的运输模型; 以临界氯离子浓度和钢筋锈蚀宽度作为寿命评估指标; 最后以某工程实例进行预测说明, 得到了如下结论:

1) 钢筋表面去钝化所需时间 T_1 和钢筋开始锈蚀至保护层开裂所需时间 T_2 对混凝土结构耐久性寿命 T 的预测起控制作用。

2) 临界氯离子浓度对结构的寿命预测有着重要的影响。并且参考本算例的计算结果, 以氯离子和氢氧根离子的比值作为临界氯离子浓度, 比用总氯离子占混凝土或水泥重量百分比作为临界氯离子浓度进行结构的寿命预测, 有着更好的安全储备。

3) 本文建立的湿热耦合环境下氯离子的运输模型可以为相关环境下的混凝土结构耐久性寿命预测提供有益的参考。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(50908059); 黑龙江省自然科学基金资助项目(E201415); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HEUCF160207)。

参考文献 (References)

- [1] 郑晓燕. 氯盐环境下混凝土结构性能劣化机理与试验[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2014: 3-6.
- [2] 余红发, 孙伟, 麻海燕, 鄢良慧. 混凝土在多重因素作用下的氯离子扩散方程[J]. 建筑材料学报, 2002, 5(3): 240-247.

- [3] Mangat, P. and Molloy, B. (1994) Prediction of Long-Term Chloride Concentration in Concrete. *Materials and Structure*, **27**, 338-346. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02473426>
- [4] Sactta, V. (1993) Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete. *ACI material journal*, **30**, 441-451.
- [5] 徐强, 俞海勇. 大型海工混凝土结构耐久性研究与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 88.
- [6] 吴瑾, 吴胜兴. 氯离子环境下钢筋混凝土结构耐久性寿命评估[J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 59-63.
- [7] Vu, K.A.T. and Stewart, M.G. (2000) Structural Reliability of Concrete Bridges Including Improved Chloride Induced Corrosion Moels. *Structural Safety*, **22**, 313-333. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-4730\(00\)00018-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-4730(00)00018-7)
- [8] 史美伦. 混凝土阻抗谱[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003: 207.
- [9] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 65.
- [10] Rodriguez, J., et al. (1996) Corrosion of Reinforcement and Service Life of Concrete. *Durability of Building Materials and Components*, London, Vol. 7, 1.
- [11] 许丽萍, 吴学礼, 黄土元. 含氯环境下混凝土使用寿命预测[J]. 上海建材学院学报, 1994, 7(4): 322-329.
- [12] 张宝兰, 卫淑珊. 华南海港钢筋混凝土暴露十年试验[J]. 水运工程, 1999(3): 6-13.

再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>