

# 沿海在役钢筋混凝土桥梁的钢筋锈蚀模型

郭冬梅<sup>1</sup>, 项贻强<sup>1,2</sup>, 程 坤<sup>1</sup>, 林士旭<sup>3</sup>, 李 威<sup>3</sup>

(1. 浙江大学 土木工程系, 310058 杭州; 2. 浙江大学 唐仲英传感材料及研究中心, 310058 杭州;  
3. 台州市公路管理处, 317000 浙江 台州)

**摘 要:** 为了更合理地确定在役钢筋混凝土桥梁的钢筋锈蚀模型, 在综合国内外已有的钢筋锈蚀模型的基础上, 进行了分类比较分析. 提出了考虑荷载影响和氯离子结合能力的钢筋锈蚀模型, 并以沿海地区钢筋混凝土桥梁为背景, 验证了该锈蚀模型的可行性. 研究表明: 考虑荷载影响和氯离子结合能力的钢筋锈蚀模型更加趋于合理, 采用这种钢筋锈蚀模型进行结构使用性能退化的模拟及结构使用寿命的预测将更有工程实践意义.

**关键词:** 桥梁工程; 钢筋混凝土桥梁; 荷载影响; 氯离子结合能力; 钢筋锈蚀模型

中图分类号: U445

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)12-0100-05

## Steel corrosion model of in-service RC bridge near coastal areas

GUO Dong-mei<sup>1</sup>, XIANG Yi-qiang<sup>1,2</sup>, CHENG Kun<sup>1</sup>, LIN Shi-xu<sup>3</sup>, LI Wei<sup>3</sup>

(1. Dept. of Civil Engineering, Zhejiang University, 310058 Hangzhou, China;

2. Cyrus Tang Center for Sensor Materials and Applications, Zhejiang University, 310058 Hangzhou, China;

3. Dept. of Taizhou Highway Management, 317000 Taizhou, Zhejiang, China)

**Abstract:** To determine the steel corrosion model of in-service reinforced concrete (RC) bridge more reasonably, the existing research literatures on steel corrosion were reviewed and compared and a revised steel corrosion model by considering the load effect and chlorine ion combining ability was developed. The model was used in study of in-service reinforced concrete bridge near coastal areas, and its validity was verified. The result shows that the model is more reasonable when compared with the traditional chloride diffusion models. It is practical to adopt the model for simulating materials deterioration and predicting structural service life.

**Key words:** bridge engineering; RC bridge; load effect; chlorine ion combining ability; steel corrosion model

钢筋锈蚀是影响混凝土结构耐久性和使用寿命的重要因素之一. 在役混凝土桥梁使得钢筋锈蚀的两大原因是: 混凝土保护层的碳化或者钢筋表面较高质量浓度的氯离子. 这二者都可引起钢筋逐渐锈蚀. 在沿海地区, 氯离子侵蚀是导致钢筋锈蚀的主要原因. 关于钢筋的锈蚀问题, 国内外学者进行了大量研究, 提出了多种钢筋锈蚀的模型,

主要分为两类: 一类是混凝土保护层开裂前, 具有代表性的主要有 Kim 模型<sup>[1]</sup>、Youping Liu 模型<sup>[2]</sup>等; 另一类是混凝土保护层开裂后, 代表性的模型有 Li 模型<sup>[3]</sup>等; 除此之外, 文献[4]在总结有关试验数据及研究基础上, 对氯离子扩散模型进行修正, 并从氯离子渗入钢筋引起锈蚀来研究预测结构的剩余使用寿命, 文献[5]借助于 Ansys 软件模拟热力耦合功能下氯离子扩散和钢筋锈胀开裂的过程, 并引入混凝土弥散裂缝模型对钢筋锈蚀和混凝土开裂进行模拟<sup>[6]</sup>. 本文考虑荷载的影响和氯离子结合能力将氯离子扩散模型引入到钢筋锈蚀模型中, 建立了考虑荷载的影响和氯离子结合能力的钢筋锈蚀模型.

收稿日期: 2011-11-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178416);

浙江省交通运输厅科技计划项目(2010H63).

作者简介: 郭冬梅(1979—), 女, 博士研究生;

项贻强(1959—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 项贻强, xiangyiq@zju.edu.cn.

1 混凝土保护层开裂前的钢筋锈蚀模型

1.1 钢筋锈蚀速率恒定的锈蚀模型

锈蚀速率恒定的模型认为在混凝土锈胀开裂前, 钢筋的锈蚀速率是不变的. 牛荻涛<sup>[7]</sup>对一般大气环境中的混凝土构件进行研究, 发现如果保护层锈胀开裂, 钢筋的锈蚀机理基本上是氧扩散控制的微电池腐蚀, 钢筋的锈蚀深度为

$$\delta_{\text{el}}(t) = \lambda_{\text{el}}(t - t_0), \tag{1}$$

$$\lambda_{\text{el}} = 46k_{\text{cr}}k_{\text{ce}}e^{0.04\theta}(RH - 0.45)^{2/3}c^{1.36}f_{\text{cu}}^{-1.83}, \tag{2}$$

$$t_0 = (c - x_0)^2/k^2. \tag{3}$$

其中:  $k_{\text{cr}}$  为钢筋位置的修正系数;  $k_{\text{ce}}$  为小环境条件修正系数;  $f_{\text{cu}}$  为混凝土立方体抗压强度, MPa;  $\theta$  为环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $RH$  为环境湿度, %;  $t$  为桥梁结构的使用年限, a;  $t_0$  为钢筋锈蚀开始时间, a,  $t_0$  由保护层碳化情况确定;  $c$  为混凝土保护层厚度, mm;  $x_0$  为碳化残量, mm;  $k$  为混凝土碳化系数.

文献[8]建议渗入型氯离子侵蚀环境下的普通硅酸盐混凝土钢筋锈蚀率估算式为

$$\ln i = 8.617 + 0.618\ln M_{\text{sl}} - \frac{3\,034}{\theta + 273} - 0.005\rho + \ln m_{\text{cl}}. \tag{4}$$

$$M_{\text{sl}} = M_{\text{s0}} + (M_{\text{s}} - M_{\text{s0}})\left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{10^{-3}c}{2\sqrt{Dt_{\text{cr}}}}\right)\right]. \tag{5}$$

式中:  $M_{\text{sl}}$  为钢筋表面的氯离子质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $m_{\text{cl}}$  为局部环境系数;  $\theta$  为钢筋处的温度,  $^{\circ}\text{C}$ , 可取大气环境温度;  $\rho$  为混凝土电阻率,  $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ , 可按实测值取用, 也可按下式计算.

$$\rho = k_{\text{p}}(1.8 - M_{\text{cl}}^{\mu}) + 10(RH - 1)^2 + 4. \tag{6}$$

式中:  $k_{\text{p}}$  为系数, 当水灰比为 0.3 ~ 0.4 或混凝土标号为 C40 ~ C50 时, 该系数为 11.1; 当水灰比为 0.5 ~ 0.6 或混凝土标号为 C20 ~ C30 时, 该系数为 5.6;  $M_{\text{cl}}^{\mu}$  是混凝土保护层中氯离子质量浓度的平均值,  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 当  $M_{\text{cl}}^{\mu} > 3.6$  时, 取  $M_{\text{cl}}^{\mu} = 3.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $M_{\text{s0}}$  是混凝土制备时氯离子的掺入量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

此时, 年平均锈蚀速率为

$$\lambda_{\text{el}} = 0.0116i. \tag{7}$$

式中:  $i$  为钢筋腐蚀电流密度,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

蒋德稳等<sup>[9]</sup>在人工气候环境下, 考虑了环境大气温度、环境相对湿度、水灰比、混凝土保护层厚度等因素, 对混凝土内的钢筋锈蚀速率的影响进行了试验研究, 利用数学回归法建立了钢筋锈蚀速率的经验公式, 用于一般自然气候条件下的混凝土内钢筋腐蚀速率的预测, 即

$$i_{\text{corr}} = 0.866\left(\frac{\theta}{30}\right)^{1.128}\left(\frac{RH}{50}\right)^{2.665}\left(\frac{C}{10}\right)^{-0.455}\left(\frac{U}{0.44}\right)^{0.386}. \tag{8}$$

式中:  $i_{\text{corr}}$  为钢筋的腐蚀电流密度,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ;  $\theta$  为环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $RH$  为环境的相对湿度, %;  $c$  为混凝土保护层厚度, mm;  $U$  为混凝土水灰比.

1.2 锈蚀速率减小的钢筋锈蚀模型

Yalsyn 等<sup>[10]</sup>认为钢筋的锈蚀速率随时间逐渐减小, 并基于试验提出模型

$$i_{\text{corr}}(r) = i_0e^{-ar}. \tag{9}$$

式中:  $i_0$  为锈蚀发生时刻的腐蚀电流密度,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ;  $a$  为常数, 取  $0.001 \text{ d}^{-1}$ .

Kim 等<sup>[1]</sup>认为钢筋表面产生的锈蚀物会阻止铁离子从钢筋表面扩散, 钢筋的锈蚀速率随时间减小, 从而给出了钢筋锈蚀速率的模型为

$$i_{\text{corr}}(t) = 0.85i_0e^{-0.29t}. \tag{10}$$

式中:  $i_0$  为初始腐蚀电流密度,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $i_0 = 37.8c^{-1}(1 - \rho)^{-1.64}$ ;  $\rho$  为水灰比, 取  $\rho = 33.75(f_{\text{cu}} + 16.875)^{-1}$ ;  $c$  为混凝土保护层厚度, mm.

Youping Liu 等<sup>[2]</sup>对实测数据的回归分析得到考虑钢筋表面的氯离子质量浓度、温度以及混凝土的电阻率等因素的钢筋锈蚀模型为

$$\ln(1.08i) = 8.37 + 0.618\ln(1.69C_{\text{cl}^-}) - \frac{3\,034}{T} - 0.000\,105R_{\text{c}} + 2.32t^{-0.215}. \tag{11}$$

式中:  $i$  为钢筋腐蚀电流密度,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ;  $C_{\text{cl}^-}$  为混凝土中钢筋表面的自由氯离子质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $T$  为钢筋表面的温度, K;  $t$  为钢筋的锈蚀时间, a;  $R_{\text{c}}$  为混凝土保护层的电阻,  $\Omega$ ; 若无实测数据, 可按下式计算.

$$R_{\text{c}} = \exp[8.03 - 0.549\ln(1 + 1.69C_1)]. \tag{12}$$

式中:  $C_1$  为混凝土保护层中氯离子质量浓度的均值,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

王元战等<sup>[11]</sup>对比分析了各种钢筋锈蚀模型后, 基于 Youping Liu 模型<sup>[9]</sup>考虑了在荷载影响将氯离子扩散模型引入到钢筋锈蚀的基本模型中, 建立了考虑荷载影响条件下的钢筋混凝土构件的钢筋锈蚀模型为

$$\ln(1.08i) = 8.37 + 0.618\ln[1.69 \times 2\,300 \times C(C, t_{\text{im}} + t)] - \frac{3\,034}{T} - 0.000\,105R_{\text{c}} + 2.32t^{-0.215}. \tag{13}$$

式中:  $i, T, R_{\text{c}}, t$  的含义与式(11)一样;  $C(C, t_{\text{im}} + t)$  为钢筋开始锈蚀后  $t$  年的钢筋表面的氯离子质量分数, %.

2 保护层开裂后的钢筋锈蚀模型

混凝土保护层开裂后钢筋锈蚀模型的相关研究较少,比较具有代表性的是 Li 模型<sup>[3]</sup>、文献[8]中的模型和牛荻涛模型, Li 模型认为保护层锈胀开裂后钢筋锈蚀速率增加,文献[8]中的模型和牛荻涛模型<sup>[1]</sup>认为钢筋锈蚀速率是不变的。

Li 模型为锈蚀速率增加的钢筋锈蚀模型<sup>[3]</sup>. Li 对海洋环境下的带有荷载裂缝的钢筋混凝土弯曲构件进行大量试验,得到了钢筋锈蚀速率随时间增加的结果,对此进行曲线拟合后得出了钢筋的腐蚀电流密度的经验公式为

$$i_{\text{corr}}(t) = 0.368\,3\ln(t) + 1.130\,5. \quad (14)$$

式中:  $i_{\text{corr}}(t)$  为  $t$  时钢筋腐蚀电流密度,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ;  $t$  为保护层开裂后的使用年限, a.

文献[8]给出混凝土保护层开裂后的钢筋年平均锈蚀速率为

$$\lambda_{\text{cl1}} = (4.5 - 26\lambda_{\text{cl}}) \cdot \lambda_{\text{cl}}. \quad (15)$$

式中:  $\lambda_{\text{cl}}$  为氯盐侵蚀环境中的混凝土保护层锈胀开裂前的钢筋年平均锈蚀速率, mm/a.

牛荻涛模型给出了混凝土保护层开裂后钢筋的年平均锈蚀速率为

$$\lambda_{\text{e2}} = \begin{cases} 2.5\lambda_{\text{cl}}, & \lambda_{\text{cl}} \geq 0.008; \\ 4.0\lambda_{\text{cl}} - 187.5\lambda_{\text{cl}}^2, & \lambda_{\text{cl}} \leq 0.008. \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\lambda_{\text{cl}}$  与式(2) 意义相同,  $\lambda_{\text{e2}}$  为混凝土保护层开裂后的钢筋年平均锈蚀速率, mm/a.

3 现有的钢筋锈蚀模型的比较分析

根据上述各种钢筋锈蚀模型,对浪溅区的钢筋混凝土构件的钢筋锈蚀速度进行计算并比较,参数取值见表 1,钢筋锈蚀速度变化分析见图 1.

表 1 不同模型参数的取值

| 模型               | 水灰比 | $C/\text{mm}$ | $\theta/^\circ\text{C}$ | $RH/\%$ | $f_{\text{cu}}/\text{MPa}$ | $k_{\text{cr}}$ | $k_{\text{ce}}$ | $R_{\text{C}}/\Omega$ | $\rho(C_{\text{cl}})/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $\rho(M_{\text{cl}})/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $m_{\text{cl}}$ |
|------------------|-----|---------------|-------------------------|---------|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------|
| 牛荻涛模型<br>(开裂前)   | 0.4 | 50            | 25                      | 80      | 26.8                       | 1.0             | 3.5             |                       |                                                     |                                                     |                 |
| 牛荻涛模型<br>(开裂后)   | 0.4 | 50            | 25                      | 80      | 26.8                       | 1.0             | 3.5             |                       |                                                     |                                                     |                 |
| 蒋德稳模型            | 0.4 | 50            | 25                      | 80      |                            |                 |                 |                       |                                                     |                                                     |                 |
| Yalsyn 模型        | 0.4 | 50            |                         |         |                            |                 |                 |                       |                                                     |                                                     |                 |
| Kim 模型           | 0.4 | 50            |                         |         |                            |                 |                 |                       |                                                     |                                                     |                 |
| Youping Liu 模型   | 0.4 | 50            | 25                      |         |                            |                 |                 | 1 048.5               | 3.542                                               |                                                     |                 |
| Li 模型            |     |               |                         |         |                            |                 |                 |                       |                                                     |                                                     |                 |
| 王元战模型            | 0.4 | 50            | 25                      |         |                            |                 |                 | 1 048.5               | 4.385                                               |                                                     |                 |
| 文献[8]模型<br>(开裂前) |     |               | 25                      | 80      |                            |                 |                 |                       | 3.542                                               | 5.0                                                 | 5.0             |
| 文献[8]模型<br>(开裂后) |     |               | 25                      | 80      |                            |                 |                 |                       | 3.542                                               | 5.0                                                 | 5.0             |

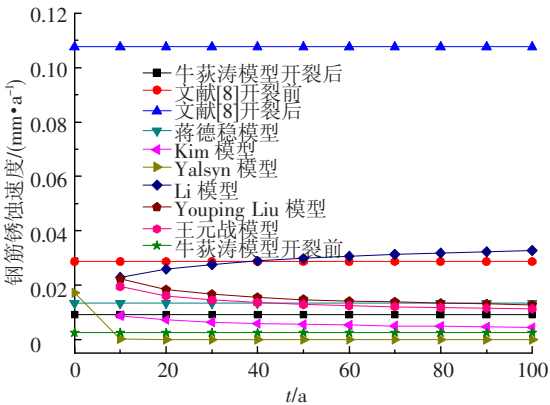


图 1 混凝土保护层开裂前后不同模型下钢筋锈蚀速率随时间的变化

从图 1 知,在混凝土保护层开裂前,钢筋的锈蚀速率分为两种,一种是速率恒定,具有代表性的是文献[8]模型、蒋德稳模型、牛荻涛模型,其中文献[8]模型计算值较大,牛荻涛模型较小,这主要是由于构件所处的环境不同,文献[8]模型对应的是氯离子侵蚀性环境,而牛荻涛模型则是相对于一般大气环境条件下建立的;另一种是钢筋锈蚀速率随时间增加而减小的模型: Kim 模型、Yalsyn 模型、Youping Liu 模型以及王元战模型,这 4 种模型总体的变化趋势是一致的. 王元战模型的建立是基于 Youping Liu 模型的,王元战模型

考虑的因素比 Youping Liu 模型多,所以更加精确贴近实际.

4 基于荷载影响和氯离子结合能力影响的钢筋锈蚀模型

混凝土是一种多相材料,存在很多内部缺陷,当荷载作用在构件的受拉区时,氯离子在混凝土中的扩散系数增大,而作用在构件的受压区时氯离子扩散系数是减少的. 本文引入影响氯离子扩散的荷载影响因子  $f(\delta)$  并考虑氯离子结合能力对混凝土的使用寿命有显著影响的参数  $R$ , 建立了氯离子扩散的修正模型<sup>[12]</sup> 为

$$C(x,t) = C_0 + (C_s - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \sqrt{\frac{f(\delta)RD_0t_0^m}{1-m} t^{1-m}}} \right) \right]. \quad (17)$$

式中:  $C_s$  为混凝土表面的氯离子质量分数,%;  $D_0$  为暴露在氯盐环境下某一基准时间  $t_0$  后测得的氯离子的扩散系数;  $C_0$  为混凝土内部的初始氯离子质量分数,%;  $m$  为氯离子扩散系数的时间依赖性系数;  $f(\delta)$  反映了荷载水平的影响系数.

在此基础上,再采用 Youping Liu 模型来建立基于荷载影响和氯离子结合能力的钢筋锈蚀模型,把式(17)代入式(11)中得

$$\ln(1.08i) = 8.37 + 0.618 \ln[1.69C(c, t_{\text{int}} + t)] - \frac{3.034}{T} - 0.000105R_c + 2.32t^{-0.215}. \quad (18)$$

式中:  $i, T, R_c, t$  的含义与式(11)一样,  $C(c, t_{\text{int}} + t)$  为混凝土保护层开裂后  $t$  时钢筋表面的氯离子质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

氯离子扩散系数为常数时,钢筋的开始锈蚀时间可估算为

$$t_i = 10^{-6} c^2 \cdot K^{-2}, \quad (19)$$

$$K = 2\sqrt{D} \operatorname{erf}^{-1}(1 - M_{\text{cr}} M_s^{-1}). \quad (20)$$

式中:  $t_i$  为钢筋的开始锈蚀时间, a;  $c$  为混凝土保护层的厚度, mm;  $K$  为氯盐侵蚀性系数, 根据文献[8]取用;  $D$  为氯离子扩散系数,  $\text{m}^2/\text{a}$ , 根据文献[8]确定;  $M_{\text{cr}}$  为钢筋锈蚀临界氯离子质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $M_s$  为混凝土表面氯离子质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

因此混凝土保护层锈胀开裂的时间可按下式估算.

$$t_{\text{cr}} = t_i + t_c. \quad (21)$$

式中:  $t_{\text{cr}}$  为保护层锈胀开裂的时间, a;  $t_c$  为钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂的时间, a.

5 数值算例

园里大桥(左线)上部结构为每跨 10 片钢筋混凝土简支空心板,钢筋直径为 18 mm,混凝土标号是 C35,保护层为 30 mm;下部结构 0 号台为重力式台, 5 号台为柱式桥台,桥墩为双柱式桥墩. 桥台基础为扩大基础和钻孔灌注桩基础,桥墩基础为钻孔灌注桩基础,墩柱及盖梁混凝土标号 C25,保护层为 30 mm;该桥已经使用了 18 a. 该桥所处环境为近海大气环境,距离海岸线不到 1 km. 假定该桥采用的水灰比为 0.4,依据文献[13]选定钢筋锈蚀的临界氯离子质量分数为 0.4%,混凝土表面的氯离子质量分数为 1.028%. 通过相应计算得到该桥钢筋开始锈蚀时间为 38.8 a,钢筋开始锈蚀后 4.5 a 混凝土保护层开裂,即混凝土保护层开裂时间为 4.5 a. 图 2、3 分别为采用王元战模型 + 文献[8]模型与修正模型 + Li 模型计算得到的钢筋锈蚀速率和钢筋的锈蚀深度随时间的变化的趋势. 可以看出,在混凝土保护层开裂前,王元战模型和修正模型的计算结果相差不大,趋势一致. 在混凝土保护层开裂后,采用文献[8]模型得到的计算结果要比采用 Li 模型的结果大. 这是因为混凝土保护层开裂后环境中的氯离子将以较快的速度直接作用于钢筋表面,必然使得腐蚀加快.

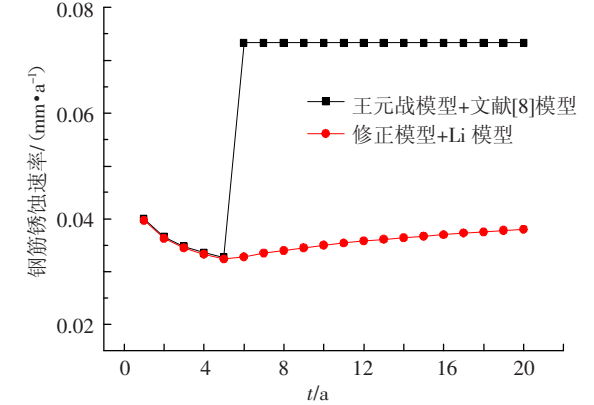


图 2 钢筋锈蚀速率随时间的变化

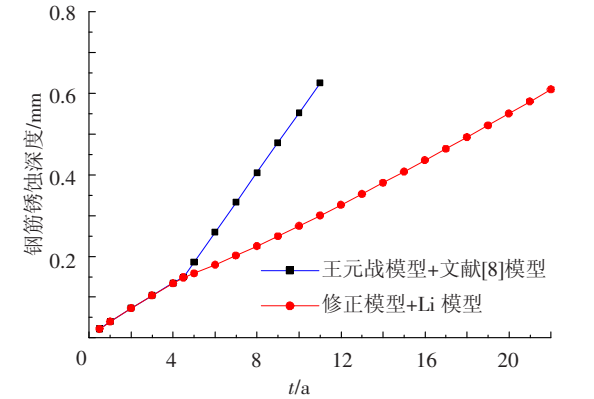


图 3 钢筋的锈蚀深度随时间的变化

## 6 结 论

1) 比较分析了目前已有的典型钢筋锈蚀模型,并基于 Youping liu 模型,建立了考虑荷载影响和氯离子结合能力的钢筋锈蚀模型,使其更加贴近实际情况;通过算例对修正后的钢筋锈蚀模型与王元战模型作了对比,结果比王元战模型更加合理.

2) 沿海地区钢筋锈蚀的过程非常复杂,受到多种因素的影响,将考虑荷载影响和氯离子结合能力影响的氯离子扩散模型引入到钢筋锈蚀模型中,可以更加准确地模拟符合实际情况的构件的材料退化情况,对预测结构的剩余使用寿命有着重要的意义.

## 参考文献:

- [1] VU K A T, STEWART M G. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models[J]. *Structural Safety*, 2000, 22(4): 313–333.
- [2] LIU Y. Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [3] LI C Q. Reliability based service life prediction of corrosion affected concrete structures[J]. *J Structure Engineer*, 2004, 130(10): 1570–1577.
- [4] 薛鹏飞,项贻强. 修正的氯离子在混凝土中的扩散模

型及其工程应用[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2010, 44(4): 831–836.

- [5] 项贻强,程坤,郭冬梅,等. 基于热力耦合的钢筋混凝土锈胀开裂的分析[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2012, 46(8): 1444–1449.
- [6] XIANG Yiqiang, CHENG Kun, GUO Dongmei, *et al.* Behavior of rust expansion cracking of concrete deduced by equivalent corrosion products of steel bar[C]//Proceeding of International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering. Nanjing: Southeast University Press, 2011: 762–768.
- [7] 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.
- [8] CECS 220. 混凝土结构耐久性评定标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [9] 蒋德稳,李果,袁迎曙. 混凝土内部钢筋腐蚀速度多因素影响的试验研究[J]. *混凝土*, 2004(7): 3–11.
- [10] YALSYN H, ERGUN M. The prediction of corrosion rates of reinforcing steels in concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1996, 26(10): 1593–1599.
- [11] 王元战,黄东旭,王军. 考虑荷载影响的钢筋混凝土构件钢筋锈蚀模型[J]. *水道港口*, 2011, 32(3): 202–206.
- [12] 郭冬梅,项贻强,程坤,等. 沿海混凝土桥的氯离子扩散模型及应用[J]. *中国公路学报*, 2012, 25(5): 89–94.
- [13] 吕清芳. 混凝土结构耐久性环境区划标准的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

(编辑 魏希柱)