

文章编号:1673-9469(2012)02-0011-05

应力作用下混凝土胀裂前钢筋锈蚀率预测模型

曾严红^{1,2}

(1. 上海市建筑科学研究院, 上海 200032; 2. 上海市工程结构新技术重点实验室, 上海 200032)

摘要:假设混凝土保护层完全碳化时钢筋开始锈蚀,利用应力状态下混凝土碳化模型,获得应力状态下混凝土中钢筋开始锈蚀时间的计算模型。根据应力状态下混凝土中CO₂有效扩散系数得到相应的O₂有效扩散系数,并通过外加电流加速锈蚀试验研究了应力状态对钢筋锈蚀速率的影响。最终基于法拉第定律建立了应力状态下混凝土中钢筋锈蚀率的预测模型,并用预测模型计算工程实例。计算结果与实测结果符合较好,同时证明随着应力水平的提高,钢筋开始锈蚀时间提前,锈蚀率加快,最终导致高应力区域锈蚀率明显高于低应力区域。

关键词:锈蚀模型;应力;电化学;混凝土结构

中图分类号:TU528.571

文献标识码:A

Prediction model for corrosion of steel bars in concrete under stress before corrosion cracking

ZENG Yan-hong^{1,2}

(1. Shanghai Research Institute of Building Sciences, Shanghai 200032, China; 2. Shanghai Key Laboratory for Innovation Technology in Engineering Structure, Shanghai 200032, China)

Abstract: It was supposed that steel bars in concrete begin to corrode when concrete cover is entirely carbonized, and the time of corrosion initiation was calculated by carbonation model of concrete under stress proposed through test study. Diffusion coefficient of O₂ was deduced with diffusion coefficient of CO₂ in concrete under stress. The effect of stress on corrosion rate of the steel bar was confirmed by experiment study. Based on the theory of corrosion electrochemistry, prediction model for corrosion of steel bars in concrete under stress before corrosion cracking was presented. The computation model was well verified by a practical engineering project. Significantly severer reinforcement was observed in higher stress concrete zone. It can be contributed to earlier corrosion initiation time and higher corrosion rate for steel bars in concrete under stress.

Key words: corrosion model; stress; electrochemistry; reinforced concrete structure

钢筋锈蚀是混凝土结构耐久性退化的主要原因之一,钢筋锈蚀对耐久性的影响主要是两个方面:一是锈蚀后钢筋截面减小、力学性能退化;二是锈蚀产物体积膨胀引起顺筋裂缝、保护层剥落,使钢筋和混凝土间粘结能力下降,并又加速钢筋锈蚀。研究锈蚀钢筋混凝土构件受力性能的关键在于钢筋锈蚀程度的确定。国内外学者就钢筋锈蚀量或锈蚀速率的计算进行了大量的研究,提出

了形式各异的锈蚀率预测模型。现有钢筋锈蚀率预测模型按其建立的途径可分为以锈蚀机理为基础的理论模型^[1]和以实践经验得出的经验模型^[2]两类,这些模型在特定的条件下具有一定的使用价值。实际结构在锈蚀过程中由于荷载的存在,混凝土和钢筋上都有应力。混凝土中的应力会影响混凝土内部孔隙结构及微裂缝的扩展,会加速有害物质和氧气在混凝土中的扩散,进而导致钢

筋开始锈蚀时间提前和钢筋的锈蚀加快。钢筋上的应力水平对钢筋锈蚀形态和锈蚀速度有影响,而普通锈蚀模型很难准确预测其锈蚀率。现有锈蚀模型大都没有考虑这些因素的影响,所以建立应力作用下钢筋的锈蚀模型能够更准确地预测混凝土结构中钢筋的锈蚀状态。

1 开始锈蚀时间

计算一般大气环境下钢筋开始锈蚀时间 t_0 , 需先确定混凝土碳化深度计算模型。国内外学者基于 Fick 第一定律提出了大量计算混凝土碳化深度的模型,文献[3]根据实测结果,回归得到混凝土碳化深度实用计算公式为

$$x_c = 839(1 - RH)^{1.1} \sqrt{\frac{w/c - 0.34}{c} C_{\infty} \sqrt{t}} \quad (1)$$

式中 $x_c - t$ 时刻完全碳化深度(mm); RH - 环境相对湿度; w/c - 水灰比; c - 单位体积混凝土水泥用量(kg/m^3); C_{∞} - 混凝土表面 CO_2 体积浓度; t - 碳化时间(d), 计算锈蚀模型时需转换为年(a)。

早期碳化模型多为材料层次模型,大都为无应力作用下碳化深度乘以应力水平或荷载水平表示的状态函数。Castel 等人^[4]将三点加载的混凝土小梁在大气环境中放置 13a, 研究混凝土受拉面的碳化情况。金祖权^[5]通过堆载方式得出以抗折强度水平表示的碳化深度荷载影响系数函数。刘亚芹^[6]基于既有混凝土碳化深度实用计算模型,通过试验回归得到碳化深度应力影响系数 k_{σ} 与混凝土应力水平 λ_c 间的关系,如式(2)、式(3)所示。

$$\text{压应力时 } k_{\sigma} = 1.916\lambda_c^2 - 1.275\lambda_c + 1 \quad (2)$$

$$\text{拉应力时 } k_{\sigma} = 0.6429\lambda_c^2 - 0.0929\lambda_c + 1 \quad (3)$$

由式(2)可以看出,当压应力水平 λ_c 不超过 0.3 时, $k_{\sigma} < 1$, 压应力对碳化延缓作用增强;当 λ_c 超过 0.3 后,由混凝土内部沿压应力方向微裂缝的扩展,压应力对碳化延缓作用逐渐减弱;当 λ_c 超过 0.7 后, $k_{\sigma} > 1$, 压应力对碳化有加速作用。通过式(3)知,拉应力作用下 $k_{\sigma} > 1$, 但 λ_c 低于 0.3 时,对碳化影响不明显, λ_c 超过 0.7 时,对混凝土碳化加速作用明显。这种影响趋势与涂永明等的研究结果相近^[7]。

将碳化深度应力影响系数引入式(1),并设

$$k_0 = 839(1 - RH)^{1.1} \sqrt{\frac{w/c - 0.34}{c} C_{\infty}} \quad (4)$$

则得到应力状态下混凝土碳化深度计算公式为

$$x_c = k_0 k_{\sigma} \sqrt{t} \quad (5)$$

根据混凝土碳化机理可知,混凝土完全碳化区与未碳化区之间存在部分碳化区。在部分碳化区内,钢筋会出现局部少量锈蚀现象,但锈蚀状态不稳定,当钢筋表面混凝土完全碳化后锈蚀才趋于稳定^[8]。假设混凝土保护层完全碳化时钢筋开始锈蚀,可由式(5)获得钢筋开始锈蚀时间为

$$t_0 = \left(\frac{C_0}{k_0 k_{\sigma}} \right)^2 \quad (6)$$

式中 C_0 - 混凝土保护层厚度。

钢筋锈蚀模型如图 1 所示,设 r 为钢筋半径,则碳化深度为 $(C_0 + 2r)$ 即碳化到钢筋内侧 C 点的时间为

$$t_1 = \left(\frac{C_0 + 2r}{k_0 k_{\sigma}} \right)^2 \quad (7)$$

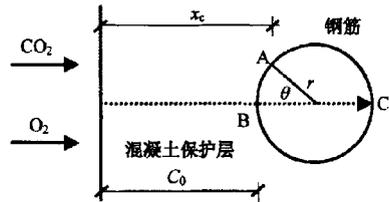


图1 钢筋锈蚀模型简图

Fig. 1 Corrosion model of steel in concrete

2 开裂前钢筋锈蚀模型的建立

根据法拉第定律,在 dt 时间内钢筋锈蚀质量损失可表示为

$$dw_i = \frac{M}{nF} I_i dt \quad (8)$$

式中 dw_i - dt 时间内钢筋质量损失(g); M - 铁的摩尔质量,取 $56 \text{ g}/\text{mol}$; n - 锈蚀产物中铁离子的化学价,因锈蚀反应的不充分性,假设锈蚀产物中 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 含量相同^[8],则 $n = 2.8$; F - 法拉第常数 $96\,500 \text{ C}/\text{mol}$; I_i - t 时刻腐蚀电流强度。

2.1 腐蚀电流的计算

计算钢筋锈蚀量,首先要确定腐蚀电流。理论上钢筋单位长度腐蚀电流为

$$I_i = \int i_t dA_t \quad (9)$$

式中 i_t - t 时刻的腐蚀电流密度; A_t - t 时刻的腐蚀面积。

根据腐蚀电化学原理^[9],混凝土中钢筋的锈蚀由氧气扩散控制,腐蚀电流密度等于氧气的极限扩散电流密度。

$$i_t = n_0 F D_0 \frac{[O_2]_0}{x_t} \quad (10)$$

式中 n_0 - 单位氧气吸收的电子数, $n_0 = 4$; D_0 - 氧气的有效扩散系数; $[O_2]_0$ - 混凝土表面氧气摩尔浓度,一般取 $8.93 \times 10^{-9} \text{ mol/mm}^3$; x_t - t 时刻锈蚀点距混凝土表面的距离。

因锈蚀开裂前腐蚀电流密度不大,假设 t 时刻腐蚀面上各点腐蚀电流密度相同,碳化到 C 点(图1)以后电流密度由氧气浓度及其扩散系数确定,则 t 时刻电流密度可表示为

$$i_t = \begin{cases} n_0 F D_0 \frac{[O_2]_0}{x_c}, C_0 \leq x_c \leq C_0 + 2r \\ n_0 F D_0 \frac{[O_2]_0}{C_0 + 2r}, x_c > C_0 + 2r \end{cases} \quad (11)$$

由于锈蚀开裂前钢筋截面损失率比较小,故忽略钢筋半径的变化,由图1求得 t 时刻单位长度钢筋锈蚀面积 A_t 为

$$A_t \approx \begin{cases} 2r \arccos \frac{r + C_0 - x_c}{r}, C_0 \leq x_c \leq C_0 + 2r \\ 2\pi r, x_c > C_0 + 2r \end{cases} \quad (12)$$

则 $C_0 \leq x_c \leq C_0 + 2r$ 时腐蚀电流为

$$I_t = i_t A_t = n_0 F D_0 \frac{[O_2]_0}{x_c} \cdot 2r \arccos \frac{r + C_0 - x_c}{r} \quad (13)$$

$x_c > C_0 + 2r$ 时腐蚀电流为

$$I_t = n_0 F D_0 \frac{[O_2]_0}{C_0 + 2r} \cdot 2\pi r \quad (14)$$

2.2 氧气有效扩散系数的确定

氧气在混凝土中的扩散系数与混凝土的孔隙率有关。根据分子运动学原理,同等条件下气体的有效扩散系数与气体摩尔质量的平方根成反比^[10],则由 CO_2 的有效扩散系数可求得 O_2 的有效扩散系数。文献[3]给出的 CO_2 有效扩散系数为

$$D_c = 0.8 \times (w/c - 0.34)(1 - RH)^{2.2} \quad (15)$$

式中 D_c 单位为 mm^2/s ,其余参数单位同式(1)。

引入应力参数,考虑应力作用时换算得 CO_2 有效扩散系数为

$$D'_c = 0.8 \times k_c^2 (w/c - 0.34)(1 - RH)^{2.2} \quad (16)$$

考虑应力作用时 O_2 在混凝土中的有效扩散系

数为

$$D_0 = \sqrt{\frac{M_{CO_2}}{M_{O_2}}} \cdot D'_c = 1.17 D'_c = 0.936 \times k_c^2 (w/c - 0.34)(1 - RH)^{2.2} \quad (17)$$

式中 M_{CO_2} - CO_2 摩尔质量,取 44 g/mol ; M_{O_2} - O_2 摩尔质量,取 32 g/mol 。

2.3 钢筋应力水平对锈蚀的影响

钢筋上的应力水平对其腐蚀速度的影响,有学者认为钢筋上应力低于其屈服应力时对腐蚀速度几乎无影响^[11]。为验证此结论的准确性,进行了钢筋应力状态下的加速锈蚀试验^[12]。

采用江阴华新钢绞线厂生产的 1860 级 $7\phi^{S15.2}$ 钢绞线的中丝,极限强度为 1950 MPa。在钢丝松弛试验仪上进行通电加速锈蚀,采用砝码加载对钢丝施加应力。共进行 3 组试验,试验参数如表 1,其应力水平为钢丝实际应力与极限强度的比值。Y1 组钢丝腐蚀电流密度为 1225 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, Y2、Y3 组钢丝腐蚀电流密度为 2450 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$; Y1、Y3 组钢丝锈蚀时间为 47 h, Y2 组钢丝锈蚀时间为 23.5 h。试验装置如图 2。取钢丝中部 400 mm 为腐蚀段,两端用环氧纱布包裹,穿上塑料瓶,瓶口做好防水处理。在塑料瓶中注入 5% NaCl 溶液作为腐蚀液,钢丝与直流电源正极连接,电源负极连接放置在腐蚀液中的铜棒,形成闭合电路进行通电加速锈蚀。基于法拉第定律控制钢丝锈蚀量。试验结果如表 1 所示,可以看出在相同条件下,随着应力水平的增加,钢丝锈蚀率略微增长,说明弹性状态下应力水平对钢丝腐蚀速度有一定影响,但不是非常明显。

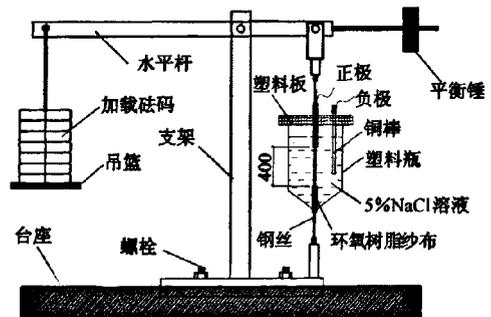


图2 应力状态下钢丝加速锈蚀装置^[12]

Fig.2 Accelerated corrosion setup for steel wire under tension

表1 试验参数和锈蚀结果

Tab.1 Details of test specimens and corrosion results

试样编号	应力水平	理论锈蚀率	实际锈蚀率	实际锈蚀率/理论锈蚀率	实际锈蚀率相对值 k_{η}
Y1-0	0	0.06	0.063 2	1.05	1
Y1-1	0.39		0.064 8	1.08	1.025
Y1-2	0.67		0.065 1	1.09	1.030
Y2-0	0	0.06	0.060 0	1	1
Y2-1	0.39		0.065 1	1.09	1.085
Y2-2	0.67		0.067 6	1.13	1.127
Y3-0	0	0.12	0.124 6	1.04	1
Y3-1	0.39		0.125 4	1.05	1.006
Y3-2	0.67		0.126 0	1.05	1.011

设 λ_s 为钢筋应力水平, k_{η} 为实际锈蚀率相对值即每根钢丝实际锈蚀率与本组无应力钢丝锈蚀率的比值, 拟合 k_{η} 与 λ_s 的关系得

$$k_{\eta} = 1 + 0.0877 \lambda_s \quad (18)$$

2.4 锈蚀预测模型

各参数代入式(8)积分, 考虑钢筋上应力水平对锈蚀量影响, 用式(18)进行修正, 同时考虑到只有溶于水的氧气才参与锈蚀反应, 以氧气在一般环境水中的溶解度 0.031 对其进行修正^[13], 积分得到单位长度钢筋锈蚀质量损失 $w(t)$ 的计算公式为 $t_0 \leq t < t_1$ 时

$$w(t) = \frac{2.784k_{\eta}rD_0}{(k_0k_{\sigma})^2} \left[\sqrt{r^2 - (r + C_0 - k_0k_{\sigma}\sqrt{t})^2} - (r + C_0 - k_0k_{\sigma}\sqrt{t}) \arccos \frac{r + C_0 - k_0k_{\sigma}\sqrt{t}}{r} \right] \quad (19)$$

$$t \geq t_1 \text{ 时 } w(t) = w(t_1) + 1.392\pi k_{\eta}rD_0 \frac{1}{C_0 + 2r} t \quad (20)$$

其中 t 为构件使用年限(a); $w(t)$ 单位为 g/mm 。

平均质量锈蚀率为

$$\eta_s = w(t) / (\pi r^2 \rho) \quad (21)$$

式中 η_s - 钢筋质量锈蚀率; ρ - 钢筋的密度, g/mm^3 。

3 模型验证

文献[14]从上海地区实际工程中取回3根自然锈蚀的钢筋混凝土梁 L1~L3, 将梁破型取出锈蚀受拉纵筋, 每根梁有两根受拉钢筋, 沿梁纵向分段测量钢筋锈蚀率, 结果如图3所示。从图中可以看出, 相同环境下梁跨中段钢筋锈蚀率明显大

于梁端位置的钢筋。实际工程中梁跨中段受拉混凝土和受拉纵筋的拉应力水平高于梁端部, 应力水平的影响使跨中段钢筋锈蚀率较大, 可见应力水平对钢筋锈蚀的影响是不可忽视的。

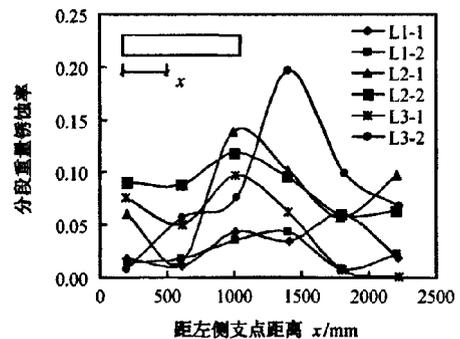


图3 梁纵筋锈蚀率沿纵向变化

Fig.3 Steel corrosion rates along longitudinal direction of the beam

文献[14]中梁 L1 未发现可见锈胀裂缝, 用梁 L1 的实测数据验证本文锈蚀模型的准确性。梁截面尺寸为 $164 \times 175 \text{ mm}$, 保护层厚度 15 mm; 服役年限 25a, 梁端部碳化深度 20 mm, 端部和跨中实测锈蚀率均值分别为 0.018 和 0.051; 实测混凝土抗压强度 25.6 MPa, 并依此反算水灰比; 钢筋半径 6 mm, 梁间距 3 m, 梁间均布荷载 0.35 kN/m^2 , 从中国气象科学数据共享服务网所列数据统计得到上海地区 30a 平均湿度为 75%。将实测数据代入式(19)计算锈蚀率, 计算结果如表2所示。从计算结果可以看出, 应力状态下钢筋开始锈蚀时间提前, 锈蚀速率较无应力状态有较大提高。锈蚀率计算结果与实测结果差异在可接受范围之内, 说明前文所推导的锈蚀模型能较准确地计算应力状态下钢筋锈蚀率。

表2 计算结果
Tab. 2 Calculation results

位置	开始锈蚀 时间/a	锈蚀速率/ (g·mm ⁻¹ ·a ⁻¹)	锈蚀率		
			计算	实测	相对误差
端部	14.1	0.001 1	0.013 0.018	27.7%	
跨中	11.4	0.003 0	0.048 0.051	8.4%	

注:相对误差=(实测值-计算值)/实测值。

4 结论

1)混凝土应力水平超过0.7后,混凝土碳化加速,钢筋开始锈蚀时间缩短。

2)随着混凝土应力水平的提高,混凝土中氧气的扩散系数增大;随着钢筋应力水平的提高,裸露钢筋的腐蚀速率也略有增大,最终导致应力状态下混凝土中钢筋锈蚀加速。

3)同一环境中高应力状态区域混凝土中钢筋开始锈蚀时间短,持续锈蚀时间长,且锈蚀速率高,以致高应力区域钢筋锈蚀率明显高于低应力区域。综合考虑以上因素的钢筋锈蚀率预测模型与实测结果符合较好。

参考文献:

- [1] 刘西拉,苗澍柯. 混凝土结构中的钢筋腐蚀及其耐久性计算[J]. 土木工程学报,1990,23(4):69-78.
[2] KIM A T, MARK G S. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models[J]. Structural Safety, 2000, 22(4):313-333.
[3] 张普,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.

- [4] CASTEL A, FRANCOIS R, ARLIGUE G. Effect of loading on carbonation penetration ration in reinforced concrete elements [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(4): 561-565.
[5] 金祖权,孙伟,张云升,等. 荷载作用下混凝土的碳化深度[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(2):179-183.
[6] 刘亚芹. 混凝土碳化引起的钢筋锈蚀实用计算模式[D]. 上海:同济大学,1997.
[7] 涂永明,吕志涛. 预应力混凝土试件碳化试验及碳化深度预测模型研究[J]. 工业建筑. 2006, 36(1):47-50.
[8] 张伟平. 混凝土结构的钢筋锈蚀损伤预测及其耐久性评估[D]. 上海:同济大学,1999.
[9] 曹楚南. 腐蚀电化学原理(第三版)[M]. 北京:化学工业出版社, 2010.
[10] VAGELIS G, MICHAEL N. Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete[J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(2):186-196.
[11] BARTON S C, GARRY W. Accelerated corrosion and embrittlement of high-strength bridge wire[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(1):33-38.
[12] 曾严红,顾祥林,张伟平,等. 锈蚀预应力筋力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(2):169-174.
[13] 周志华,吴涤尘. 溶解、溶解度及计算[M]. 北京:科学普及出版社,1987.
[14] 张伟平,王晓刚,顾祥林,等. 加速锈蚀与自然锈蚀钢筋混凝土梁受力性能比较分析[J]. 东南大学学报:自然科学版增刊(II), 2006, 36, Sup(II):139-144.

(责任编辑 刘存英)