

混凝土结构中的钢筋腐蚀及其 耐久性计算*

刘西拉 苗澍柯

(清华大学)

【提要】 本文对混凝土中钢筋腐蚀的电化学过程从理论上进行了定量分析和描述, 提出了钢筋腐蚀的物理模型。建立了一个具体计算模式, 对四种典型情况分别进行分析, 即: 大气中普通钢筋混凝土结构; 大气中预应力钢筋混凝土结构; 海水中普通钢筋混凝土结构; 海水中预应力钢筋混凝土结构。同时引入了结构寿命概念, 根据腐蚀过程的计算定义四个控制时间来决定实际寿命。最后, 给出了四个具体实例以及寿命与结构参量间的关系曲线, 说明定量计算结构的耐久性是不可能的。

一、引言

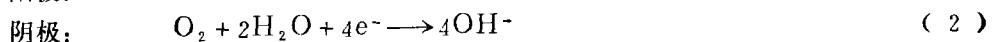
当前, 钢筋混凝土结构的耐久性越来越为国内外所关注。大量工程实际证明, 钢筋腐蚀是影响钢筋混凝土结构寿命的重要因素。

包裹在混凝土中的钢筋在一定条件下是会腐蚀的, 随着腐蚀的加剧, 将导致混凝土保护层开裂、钢筋与混凝土间粘结力破坏、钢筋受力截面减小、结构强度降低等一系列不良后果。本文试图建立一套计算模式, 从定量的角度描述这一过程。

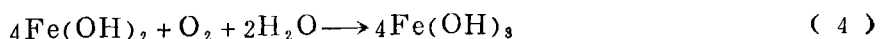
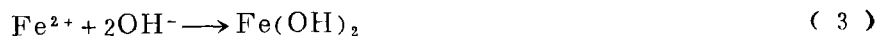
涉及钢筋腐蚀的影响因素较多, 本文仅从一些主要因素着手。由于缺乏实验数据, 文中有一些参数是经专家商讨后决定的。

二、混凝土中钢筋腐蚀的机理

混凝土中钢筋的腐蚀一般为电化学腐蚀。当氯离子侵入, 混凝土环境碱性降低或受拉开裂等因素造成全部或局部地破坏了钢筋表面钝化状态时, 钢筋表面不同部位出现较大的电位差, 形成阳极和阴极。在一定的环境条件下(如氧和水的存在), 钢筋开始腐蚀。腐蚀的形式一般为斑状腐蚀, 即腐蚀分布在较广的表面面积上, 但腐蚀深度不大(暂不考虑应力腐蚀)。混凝土环境是一个高碱度的环境, 腐蚀过程如图1所示。电极反应式为



阳极表面二次化学过程



* 国家自然科学基金资助项目

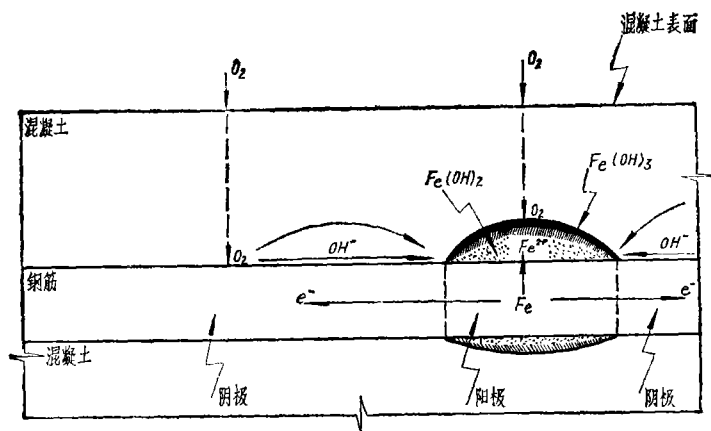


图 1 钢筋锈蚀电化学过程示意图

在此，阳极反应产生的多余电子通过钢筋送往阴极，阴极产生的氢氧根离子通过混凝土的孔隙以及钢筋表面与混凝土间的空隙中的电解质被送往阳极，从而形成一个腐蚀电流的闭合回路，使电化学过程得以实现。需要说明，构件类型及腐蚀环境的不同，将使钢筋去钝方式和电极面积有较大差别，但其腐蚀机理总是相同的。

三、腐蚀过程的物质质量描述及电化学理论计算

腐蚀所涉及的物质有 H_2O 、 O_2 、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 以及 Cl^- 。我们把与混凝土表面垂直且通过钢筋中心的平面做为分析平面，并以混凝土表面和钢筋表面为界。对该平面上任一点由物质守恒得

$$\begin{cases} \frac{\partial U_w}{\partial t} + \nabla J_w = 0 \\ \frac{\partial U_o}{\partial t} + \nabla J_o - J_w \cdot \nabla U_o = 0 \\ \frac{\partial U_c}{\partial t} + \nabla J_c - J_w \cdot \nabla U_c = 0 \\ \frac{\partial U_f}{\partial t} + \nabla J_f - J_w \cdot \nabla U_f = 0 \end{cases} \quad (5)$$

在此忽略了由孔隙水渗透引起的水量变化以及钢筋表面很薄范围内的电极反应引起的 O_2 和 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 的变化。由Fick定律得扩散关系

$$\begin{cases} J_w = -D_w \cdot \nabla U_w \\ J_o = -D_o \cdot \nabla U_o \\ J_c = -D_c \cdot \nabla U_c + D_{c1} \cdot \nabla \varphi \\ J_f = -D_f \cdot \nabla U_f \end{cases} \quad (6)$$

式中 J 表示某物质通过混凝土孔隙的扩散流量； U 表示某物质在混凝土中的含量； D 表示某物质的扩散系数；角标 w 为孔隙水， o 为氧气， c 为氯离子， f 为氢氧化亚铁。由欧姆定律及Maxwell方程得

$$\begin{cases} \lambda \cdot i = -\nabla \varphi \\ \nabla i = 0 \end{cases} \quad (7)$$

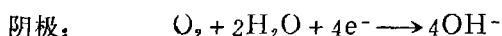
式中 φ 、 i 分别为某点的电势和电流密度； λ 为混凝土电阻率。式(5)、(6)、(7)组成了基本微分方程，与电场及物质质量的边界条件和初始条件一起便可完整地描述腐蚀过程中各点物质的变化。

在钢筋表面的阳极区域， $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 被氧化为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ，也存在一定的速度，由反应动力学的反应速度定律得

$$\begin{cases} \dot{m}_r = Z_r \cdot u_r \cdot u_o \\ \dot{m}_r = -k_{fr} \cdot \dot{m}_r \\ \dot{m}_o = -k_{or} \cdot \dot{m}_r \end{cases} \quad (8)$$

式中 Z_r 为反应速度系数； m 为阳极区域某物质质量；角标 r 为氢氧化铁； k_{AB} 为 A 与 B 分子量之比。式(8)是对阳极区域的补充。

此外，根据电化学基本理论，可导出腐蚀电流的计算公式。以阴极为例(图1)，根据 Nernst 公式可得阴极电势



$$\varphi' = \varphi_o' + \frac{RT}{n \cdot F} \ln \frac{[\text{O}_2] \cdot [\text{H}_2\text{O}]^2}{[\text{OH}^-]^4} \quad (9)$$

取 $[\text{H}_2\text{O}] = 1$ 得

$$\varphi' = \varphi_o' - \frac{4RT}{n \cdot F} \ln [\text{OH}^-] + \frac{RT}{n \cdot F} \ln [\text{O}_2] \quad (10)$$

式中 $\varphi_o' = 0.41 \text{ V}^{(1)}$ ， $n = 4$ 。

电极电势的计算还需考虑电极极化。由于混凝土中的传质方式以扩散为主，故应着重考虑浓度极化。电化学极化可忽略；电阻极化则应根据不同腐蚀模型而定，当腐蚀为宏电池时需考虑，为微电池时其影响成份较小。

在阴极，电极反应中的 O_2 和 OH^- 均可引起阴极浓度极化。假定扩散为线性扩散，取 O_2 和 OH^- 的线性扩散层厚度分别为混凝土保护层厚度 L 和 $\delta_{\text{OH}^-}^o$ ，扩散系数分别为 D_{O_2} 和 $D_{\text{OH}^-}^o$ 。当扩散稳定时，由 Fick 定律及电量与物质质量平衡条件可得

$$\frac{i^c}{n \cdot F} = D_{\text{O}_2} \left(\frac{[\text{O}_2]_{cs} - [\text{O}_2]_{ss}^o}{L} \right) \quad (11)$$

$$\text{即} \quad [\text{O}_2]_{ss}^o = [\text{O}_2]_{cs} \left(1 - \frac{i^c}{i_L^o} \right) \quad (12)$$

式中 角标 ss 代表钢筋表面； cs 代表混凝土表面； i_L^o 为阴极极限电流密度。

$$i_L^o = \frac{n \cdot F D_{\text{O}_2} [\text{O}_2]_{cs}}{L} \quad (13)$$

类似可得

$$[\text{OH}^-]_{ss}^o = [\text{OH}^-]_s + \frac{\delta_{\text{OH}^-}^o}{n \cdot F D_{\text{OH}^-}^o} i^c \quad (14)$$

故阴极极化电势为

$$\varphi_s^c = \varphi_o' - \frac{4RT}{n \cdot F} \ln [\text{OH}^-]_s + \frac{RT}{n \cdot F} \ln [\text{O}_2]_{cs}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{RT}{n^c F} \ln \left(1 - \frac{i^c}{i_L^c} \right) \\
& - \frac{4RT}{n^c F} \ln \left(1 - \frac{\delta_{OH^-}^c}{n^c F D_{OH^-}^c [\text{OH}^-]} i^c \right) \quad (15)
\end{aligned}$$

由于阴、阳极反应均在混凝土中进行, 近似取 $\delta_{OH^-}^A = \delta_{OH^-}^c$, $D_{OH^-}^A = D_{OH^-}^c$, 则式(15)的最后一项化为

$$- \frac{4RT}{n^c F} \ln \left(1 + 2 \cdot \frac{i^A}{i^c} \right) \quad (16)$$

由于阴极反应中控制步骤为: $\text{O}_2 + e^- \longrightarrow \text{O}_2^-$, 故式(15)中第四项中的 n^c 应取 1。以类似的方法可得阳极极化电势为

$$\varphi_A^A = \varphi_0^A - \frac{2RT}{n^A F} \ln [\text{OH}^-]_A \quad (17)$$

由式(15)、(16)、(17)及欧姆定律得方程组如下

$$\begin{cases}
I = \frac{\varphi_i^c - \varphi_A^A}{R^*} \\
\varphi_A^A = \varphi_0^A - \frac{2RT}{n^A F} \ln [\text{OH}^-]_A \\
\varphi_i^c = \varphi_0^c - \frac{4RT}{n^c F} \ln [\text{OH}^-]_c + \frac{RT}{n^c F} \ln [\text{O}_2]_{c,s} + \frac{RT}{n^c F} \ln \left(1 - \frac{i^c}{i_L^c} \right) - \frac{4RT}{n^c F} \ln \left(1 + 2 \cdot \frac{i^A}{i^c} \right) \\
i^A = \frac{I}{S^A} \\
i^c = -\frac{I}{S^c}
\end{cases} \quad (18)$$

式中 R^* 为腐蚀电流闭合回路的总电阻; S^A , S^c 分别为阳、阴极面积; $n^c = 1$ 。由此方程组即可求出理论上的腐蚀电流值, 其中重要的影响因素是氧气在混凝土中的扩散。

四、混凝土中钢筋腐蚀的物理模型

至此我们可以建立一个混凝土中钢筋腐蚀的简单物理模型。它所描述的腐蚀过程如下:

1. 环境条件(如混凝土含水量、腐蚀所需物质的浓度等)满足腐蚀要求。
2. 氧气、二氧化碳、氯离子通过混凝土保护层扩散至钢筋表面。
3. 二氧化碳的碳化作用或氯离子的活化作用使钢筋表面的钝化状态破坏。
4. 去钝后的钢筋表面形成相邻的阳极和阴极, 组成原电池, 开始电化学腐蚀。
5. 混凝土中钢筋腐蚀形式以斑状腐蚀为主, 腐蚀深度不大。
6. 阴、阳极的电极电势由Nernst公式决定。
7. 电极极化主要是浓度极化, 尤其是阴极氧所引起的浓度极化。
8. 阳极产生的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 向外扩散并进一步被氧化为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。
9. 腐蚀产物量由Faraday Law决定, 产物生成速度由Reaction Kinetics决定。

五、去钝时间及腐蚀电流的计算

去钝时间 (t_p)，即混凝土中钢筋表面钝化状态破坏所需的时间。促使钢筋去钝的外界因素有两个，即混凝土保护层的碳化和氯离子的侵入。

二氧化碳的碳化作用使得混凝土的碱度降低，从而破坏钢筋的钝态。国内外学者所做的大量实验表明碳化深度可近似由下式表达^[2]

$$x = \alpha \cdot \sqrt{t} \quad (19)$$

式中 x 为碳化深度； t 为碳化时间； α 为碳化速度常数，取值可参阅文献[2]。

氯离子可在碱度较高的介质中破坏钢筋钝化状态的完整性而引起钢筋腐蚀。试验表明，使钢筋腐蚀的 Cl^- 活度与 OH^- 离子活度的临界比值为 0.6^[3]，故取 Cl^- 去钝临界浓度为

$$[\text{Cl}^-]^* = 0.6[\text{OH}^-] \quad (20)$$

则氯离子侵蚀导致钢筋去钝所需时间为^[4]

$$t_p = \frac{1}{12D_{\text{Cl}^-}} \left(\frac{L}{1 - \sqrt{[\text{Cl}^-]^*/[\text{Cl}^-]^{e,s}}} \right)^2 \quad (21)$$

式中 D_{Cl^-} 为氯离子在混凝土中的扩散系数。

第三节中腐蚀电流的计算方法是理论方法，现在从电极表面氧气消耗的角度来实际地计算腐蚀电流。设氧气在混凝土中的扩散为线性的，则扩散稳定后由物质平衡得

$$\begin{cases} D_0^c \cdot \frac{U_0^{e,s} - U_0^{e,s,c}}{L^c} - k_{0,i}^c \cdot \frac{I}{S^c} = 0 \\ D_0^A \cdot \frac{U_0^{e,s} - U_0^{e,s,A}}{L^A} - k_{0,i}^A \cdot \frac{I}{S^A} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

上式可变形为

$$\begin{cases} U_0^{e,s} - U_0^{e,s,A} = k_1 (U_0^{e,s} - U_0^{e,s,c}) \\ U_0^{e,s,c} = U_0^{e,s} - k_{0,i}^c \frac{L^c}{D_0^c \cdot S^c} \cdot I \end{cases} \quad (23)$$

式中 $k_1 = \frac{k_{0,i}^A \cdot D_0^c \cdot S^c \cdot L^A}{k_{0,i}^c \cdot D_0^A \cdot S^A \cdot L^c}$ ，这里 $k_{0,i}^c$ ， $k_{0,i}^A$ 分别为阴、阳极电极反应中氧气量与电量的关系常数； L^c ， L^A 分别为阴、阳极的扩散层厚度（一般为混凝土保护层厚度）。根据阴、阳极表面氧气的消耗程度可把腐蚀分为三种情况。

1. 阴极氧控制。即 $k_1 < 1$ ，阴极氧已耗尽而阳极还有剩余。由式(23)得阳极电流密度

$$i^A = \frac{1}{k_{0,i}^c} \cdot \frac{S^c}{S^A} \cdot \frac{U_0^{e,s}}{L^c} \cdot D_0^c \quad (24)$$

对于宏电池，阴极氧控制往往不是处处成立的，除与阳极邻近的局部区域，其他地方的氧通常未被耗尽，故在具体计算中需做仔细处理。

2. 阳极氧控制。该情况从理论上讲不能称为控制。

3. 氧平衡控制。阴、阳极表面的氧同时耗尽， $k_1 = 1$ 。因 $k_{0,i}^c = 2k_{0,i}^A$ ，并粗略认为 $D_0^A = D_0^c$ ，则可得

$$\frac{S^c}{S^A} = 2 \cdot \frac{L^c}{L^A} \quad (25)$$

i^A 的计算仍可用式(24)，该情况常在微电池腐蚀中实现。

六、四种典型情况下钢筋腐蚀全过程实用计算公式的建立

根据腐蚀环境、使用条件下结构或构件是否出现横向裂缝的不同先考虑四种典型情况:

- (1) 普通大气中的普通钢筋混凝土结构。(2) 普通大气中的预应力钢筋混凝土结构。
(3) 海水中的普通钢筋混凝土结构。(4) 海水中的预应力钢筋混凝土结构。

对于情况(1), 结构在承受约40%的设计荷载后即出现裂缝并允许带裂缝工作, 裂缝深度通常到达钢筋表面(图2)。钢筋表面处的裂宽通常很小^[5], 计算中可忽略其影响。

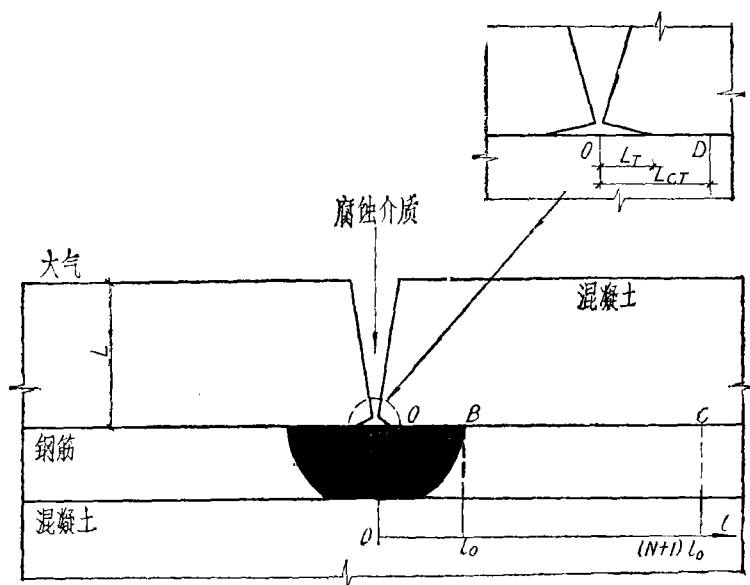


图2 典型情况(1)腐蚀示意图

对该情况作如下计算假定: (1) 腐蚀为宏电池腐蚀。混凝土的碳化使钢筋去钝的唯一方式。以裂缝端部为轴心, 以 l_0 (t 时刻的碳化深度)为半径的圆柱体与钢筋相交所得的钢筋表面面积为宏电池的阳极(即图2中涂黑部分)。(2) 阳极周围区域可形成阴极。为便于计算取有效阴、阳极面积比为 N (有效阴极面积指将不均匀耗氧的阴极面积换算成钢筋表面氧浓度为零的面积)。(3) 阴、阳极在钢筋表面所处的深度位置(即距混凝土表面的距离)相同。(4) 氧控制形式为阴极氧控制。以有效阴极面积衡量。(5) 腐蚀介质可由裂缝进入混凝土, 加快钢筋的腐蚀。

在图2中OB为阳极范围, BC为阴极范围, 由式(24)可得 t 时刻($t > t_p$)消耗由裂缝和由混凝土表面扩散至钢筋的氧所产生的阳极电流平均电流密度 i_1^A 和 i_1^A 分别为

$$i_1^A = \frac{\int_{l_0}^{(N+1)l_0} \frac{1}{k_{0t}} \cdot N \cdot \frac{U_{0t}^{\circ}}{L^{\circ}} \cdot D_0^{\circ} \cdot dl}{\int_{l_0}^{(N+1)l_0} dl} = \frac{\ln(N+1) \frac{U_{0t}^{\circ}}{k_{0t} l_0} \cdot D_0^{\circ}}{\frac{\ln(N+1) \cdot U_{0t}^{\circ} \cdot D_0^{\circ}}{k_{0t} \cdot \alpha \cdot \sqrt{t}}} \quad (26)$$

$$i_2^A = \frac{N \cdot U_0^{cs} \cdot D_0^c}{k_{0i}^c \cdot L} \quad (27)$$

取较脱开长度更深的点 D 作为腐蚀开裂控制点, $\overline{OD} = L_{OT}$ (图2), 则 D 点的去钝时间以及 t 时刻 ($t > t_p$) D 点的总腐蚀电流密度为

$$t_p = \left(\frac{L_{OT}}{\alpha} \right)^2 \quad (28)$$

$$\int_0^t i^A dt = \int_0^t (i_1^A + i_2^A) dt = \frac{2 \ln(N+1) U_0^{cs} \cdot D_0^c}{k_{0i}^c \cdot \alpha} (\sqrt{t} - \sqrt{t_p}) + \frac{N \cdot U_0^{cs} \cdot D_0^c}{k_{0i}^c \cdot L} (t - t_p) \quad (29)$$

由于腐蚀产物松散造成腐蚀后体积膨胀, 钢筋表面某点腐蚀增长高度 h 可计算如下

$$h = \frac{k_{ri} \int_0^t i^A dt}{\beta} \quad (30)$$

式中 β 为体积膨胀系数; k_{ri} 为腐蚀产物量与电量间的关系常数。体积膨胀将导致混凝土内力的变化, 由弹性力学结果作近似处理得到力与变形的关系为^[4]

$$\Delta D = \delta_{pp} \cdot P_r \quad (31)$$

$$\delta_{pp} = \frac{D}{E_{st}} (1 + \nu) + \frac{D^3}{4 E_{st} L (L + D)} + \frac{2 D^3}{s^2 E_{st}} \quad (32)$$

式中 D , s 为钢筋直径和间距; $E_{st} = \frac{E}{1 + \varphi_{cr}}$; E 为混凝土抗压弹性模量; φ_{cr} 为徐变系数; ν 为混凝土泊松比。对腐蚀开裂的主要类型(图3), 由力的平衡得钢筋直径开裂极限增长量

$$\Delta D^* = 2 f_t \cdot \frac{L}{D} \cdot \delta_{pp} \quad (33)$$

式中 f_t 为混凝土抗拉强度。取钢筋表面的腐蚀增长厚度的有效均值等于 $\Delta D^*/2$ 为开裂条件, 则由下式即可解得腐蚀开裂时间 t_{cr}

$$k_a \left[\sqrt{t} - \frac{\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + L_{OT}^2} + L_{OT}}{2\alpha} \right] + k_b \left[t - \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + 2 L_{OT}^2}{2\alpha^2} \right] = \frac{\Delta D^*}{2} \quad (34)$$

$$\text{式中 } k_a = \frac{k_{ri} 2 \ln(N+1) U_0^{cs} D_0^c}{\beta k_{0i}^c \alpha} \quad k_b = \frac{k_{ri} N U_0^{cs} D_0^c}{\beta k_{0i}^c L}$$

腐蚀开裂后腐蚀加剧, t 时刻钢筋截面损失面积为

$$\Delta S = K_{Fr} \cdot \frac{\beta}{\beta_F} \cdot \left[\frac{\pi D \Delta D^*}{2} + \frac{2.61 \pi K_{ri} N U_0^{cs} D_0^c}{K_{0i}^c \cdot \beta} (t - t_{cr}) \right] \quad (35)$$

式中 K_{Fr} 为 Fe 和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 分子量之比; β_F 为钢筋截面损失参数。此外当腐蚀层厚度达到一定数值时往往会导致钢筋与混凝土之间的粘结破坏。

其他三种情况与第一种不同, 其腐蚀为微电池腐蚀, 阴、阳极面积小, 彼此紧邻, 腐蚀为氧平衡控制。情况(2)的去钝方式为混凝土保护层的碳化, 情况(3)、(4)则是由于氯离子的侵入, t_p 的计算公式是不同的。对于不同的典型情况需分别提出各自的计算假定, 按与情况(1)类似的思想作具体处理。这里仅列出各种情况的腐蚀开裂条件。

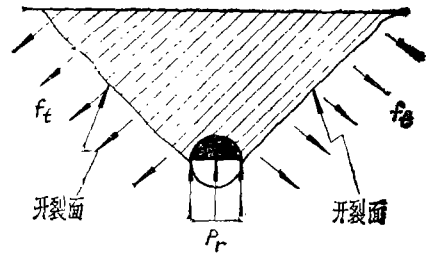


图3 腐蚀开裂

$$\text{情况 (2): } -\frac{1}{3} - \frac{K_{r1}}{K_{r1}^* \beta} U_{0.1}^* D_0 \left[\frac{4L+D}{L(2L+D)} t - \frac{4L+D}{2\alpha_{s,cr}^2} \right] = \Delta D^* \quad (36)$$

$$\text{情况 (3): } \frac{K_{r1} U_{0.1}^* D_0}{3K_{r1}^* \beta L^*} \left(t - \frac{L^{*2}}{\alpha_{s,cr}^2} \right) = \frac{\Delta D^*}{2} \quad (37)$$

$$\text{式中 } L^* = \min \left(L + \frac{D}{2}, \sqrt{L_{cr}^2 + \left(\frac{D}{2} \right)^2} \right);$$

$$\alpha_{s,cr} = \sqrt{12D_{cl} - (1 - \sqrt{[cl]^*/[cl]^{cr}})}$$

$$\text{情况 (4): } \frac{K_{r1} U_{0.1}^* D_0}{3K_{r1}^* \beta} \left(-\frac{4L+D}{L(2L+D)} t - \frac{4L+D}{2\alpha_{s,ab}^2} \right) = \Delta D^* \quad (38)$$

七、结构寿命的引入及其确定

钢筋混凝土结构的寿命是指从结构建造完成起到结构不能满足设计要求止的时间。在此期间结构效用无严重损失,不需维护和修缮。根据前面的描述可选定四种腐蚀控制时间:

(1) 钢筋去钝时间 t_p , 当 $t > t_p$ 时, 钢筋开始腐蚀。(2) 腐蚀开裂时间 t_{cr} , 当 $t > t_{cr}$ 时, 腐蚀致使混凝土保护层出现纵向裂缝。(3) 粘结破坏时间 t_{cb} , 当 $t > t_{cb}$ 时, 钢筋腐蚀层厚度大于引起粘结力破坏的极限厚度, 致使粘结破坏。(4) 钢筋面积损失极限时间 t_{ab} , 当 $t > t_{ab}$ 时, 钢筋面积损失超过设计安全值, 造成钢筋受力破坏。

对一般结构或构件, 以受力破坏为标准, 取寿命 $= \min(t_{cb}, t_{ab})$ 是恰当的。对于有装修、观感等要求的结构或构件可取 t_{cr} 为寿命。

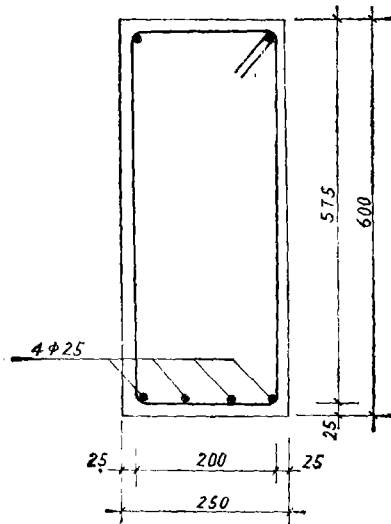


图4 梁截面

八、实例计算及结构寿命与结构参量间的关系

为了更好地说明问题, 根据前面的实用计算公式对四种典型情况分别举例说明。

(一) 大气中普通钢筋混凝土梁

梁截面如图4所示, 混凝土采用300号, 配合比为水:水泥:砂:石 = 0.48:1:1.76:3.27, 水泥使用400号普通水泥, 混凝土容重为 2400 kg/m^3 。

由原始数据可解得: $t_{cr} = 55.6$ 年; $t_{cb} = 150.9$ 年; $t_{ab} = 443.6$ 年。故梁的寿命为150.9年。

(二) 大气中预应力钢筋混凝土单向板

板截面如图5所示, 采用先张法, 钢筋与混凝土直接接触。混凝土材性同上。

由此数据可解得: $t_{cr} = 68.1$ 年; $t_{cb} = 193.8$ 年; $t_{ab} = 1648.9$ 年。故该板寿命为193.8年。

(三) 海水中普通钢筋混凝土基础

基础所用钢筋的直径为18mm, 间距为100mm, 混凝土保护层厚度为20mm, 截面略, 混凝土材性同前。

可解得: $t_{cr} = 95.5$ 年; $t_{cb} = 2741.7$ 年; $t_{ab} = 211.9$ 年。故该基础寿命为211.9年。

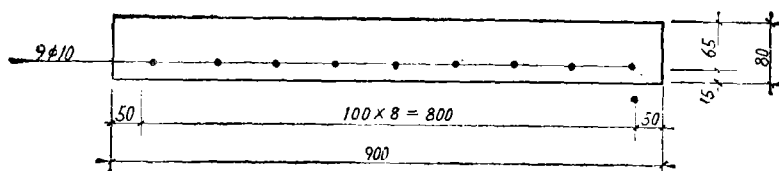


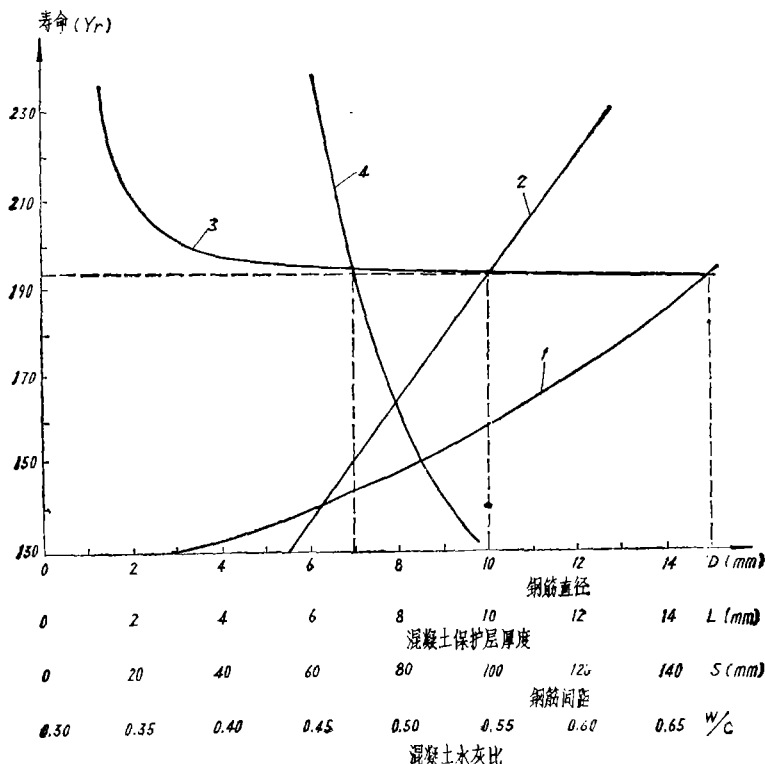
图 5 板截面

(四) 海水中预应力钢筋混凝土单向板

板数据同情况(二), 可解得: $t_{cr} = 109.1$ 年; $t_{cb} = 393.1$ 年; $t_{sb} = 3697$ 年。故板的寿命为393.1年。

上面结果均为构件的寿命, 一个结构的寿命通常可由某个或某些主要受力构件或有特殊要求部分的寿命来决定。在寿命计算中涉及以下变量: t , D , s , L , U , D_o , E , f_t , α , N , L_{cr} 。其中 U 和 D_o 与环境及混凝土材性有密切关系。

在实例计算中分别改变 D , s , L , W/C (水灰比) 等的值, 得到寿命与这些参量的大量关系曲线, 图 6 仅为典型情况(二)的一部分曲线。从这些曲线可得以下结论: 寿命随 D 的增大而增大, 但曲线较平坦; 寿命随 s 的增长而渐趋稳定; 寿命随 L 的增长而增长, 增长速度为 L 的 1 ~ 2 次幂; 寿命随着 W/C 的增长呈负指数幂形式急速下降。这些结论不仅与有关专家在提高钢筋混凝土结构耐久性方面采取的有效措施一致, 而且与国外有关设计资料中一些公认的结果一致^[6]。



1— $t-L$ 曲线; 2— $t-D$ 曲线; 3— $t-s$ 曲线; 4— $t-W/C$ 曲线

图 6 寿命与结构参量间的关系曲线

九、结 论

1. 混凝土中钢筋腐蚀过程是一个电化学过程, 对这一过程可作定量的描述, 本文给出了一个具体的计算模型。

2. 钢筋腐蚀是影响钢筋混凝土结构寿命的主要因素, 寿命值可由腐蚀控制时间决定, 具体取值可根据腐蚀开裂、粘结破坏、截面损失破坏等不同的破坏标准决定。

3. 寿命与钢筋直径、混凝土保护层厚度及混凝土水灰比等重要参量存在确定的量的关系。本文模型计算的结果与国内外设计人员的经验相符, 有实际意义。对预应力钢筋混凝土结构, 应考虑将本文结果与应力腐蚀所得的结果综合而定。

4. 科学地计算钢筋混凝土结构的耐久性是不可能的。本文仅把钢筋电化学腐蚀作为决定结构寿命的唯一因素, 有关此模型的随机分析将于另文发表。

参 考 文 献

- [1] 魏宝明: 《金属腐蚀理论及应用》, 化学工业出版社, 1984年。
- [2] 山东建科所耐久性专题组: 《混凝土碳化与钢筋锈蚀调查研究报告》, 山东建科所, 1981年2月。
- [3] George J. Verbeek: 《混凝土中钢筋腐蚀的机理》, 陆伯强译, 山东建科所, 1979年。
- [4] Bažant, Z.P.: Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures—Application, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.105, No.ST6, June, 1979, Proc. Paper 14652, PP1155-1165.
- [5] 王传志、滕智明: 《钢筋混凝土结构理论》, 建筑工业出版社, 1985年。
- [6] Somerville, G.: The Design Life of Concrete Structures, The Structural Engineer, Part A, Vol.64A, No. 2, FEB.1986.

STEEL CORROSION AND THE DURABILITY CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Liu Xila Miao Shuke

(Tsinghua University)

Abstract

The electrochemistry processes of corrosion of steel embedded in concrete is described and analysed theoretically and quantitatively in the paper first. A physical model for steel corrosion in concrete is developed. Then, practical corrosion formulations are established and four situations are considered, (1) reinforced concrete structures in the air, (2) prestressed reinforced concrete structures in the air, (3) reinforced concrete structures in the sea, (4) prestressed reinforced concrete structures in the sea. The concept of structure lifetime is introduced and its values are decided by four governing times, (1) the depassivation time, (2) the corrosion cracking time, (3) the breaking time of bond between concrete and steel, (4) the steel area losing time. At last, four examples and the relative curves between the structure lifetime and structure parameters are given, which prove that it is possible to calculate the durability of structures quantitatively.