

氯离子侵蚀钢筋混凝土管桩的使用寿命预测

邵伟^{1,2}, 李镜培^{1,2}

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀机理, 将钢筋混凝土管桩的使用寿命分为 2 个阶段, 锈蚀初始阶段和裂缝扩展阶段. 依据 Fick 第二定律和 Faraday 定律, 分别建立了氯离子在钢筋混凝土管桩中的扩散方程和氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀模型, 通过确定临界氯离子浓度和钢筋临界锈蚀深度, 分别对锈蚀初始阶段时间和裂缝扩展阶段时间进行了预测. 并在此基础上, 进一步分析了表面氯离子浓度、扩散系数、保护层厚度、钢筋直径、体积膨胀率以及抗拉强度与弹性模量的比值等因素对钢筋混凝土管桩使用寿命的影响. 分析结果表明, 随着表面氯离子浓度、扩散系数、钢筋直径和体积膨胀率的增大, 管桩的使用寿命减小; 随着保护层厚度和抗拉强度与弹性模量的比值的增大, 管桩的使用寿命增大.

关键词: 钢筋混凝土管桩; 氯离子扩散; 钢筋锈蚀; 裂缝扩展; 使用寿命

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

Service Life Prediction of Reinforced Concrete Pipe Pile Due to Chloride Ion Corrosion

SHAO Wei^{1,2}, LI Jingpei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the chloride-induced reinforcing steel corrosion mechanism, the service life of reinforced concrete (RC) pipe piles can be divided into two phases, *i. e.*, the corrosion initiation phase and the crack propagation phase. Based on Fick's second law and Faraday's law, the governing equation of chloride diffusion into RC pipe pile was established and a chloride-induced reinforcement corrosion model in RC pipe pile was developed. The corrosion initiation phase time and crack propagation phase time were predicted by determining the critical chloride concentration and the critical attack penetration depth, respectively. Then the effect of

surface chloride ion concentration, diffusion coefficient, cover thickness, reinforcement diameter, volume expansive ratio and the ratio of tensile strength to elastic modulus on service life of RC pipe piles was further analyzed, respectively. The analysis results indicate that the service life of RC pipe pile decreases with the increasing of surface chloride ion concentration, diffusion coefficient, reinforcement diameter and volume expansive ratio, while the service life of RC pipe pile increases with the increasing of cover thickness and the ratio of tensile strength to elastic modulus.

Key words: reinforced concrete pipe pile; chloride diffusion; reinforcement corrosion; crack propagation; service life

随着港口、交通、石油与风电工程建设的不断发展, 钢筋混凝土管桩越来越多地应用于海港码头、跨海大桥、海上石油平台、海上风机等海洋工程中. 然而, 服役于海洋环境中的钢筋混凝土管桩将长期暴露于严重的氯离子侵蚀环境中, 海洋环境中的氯离子将通过扩散、毛细管吸附、渗透和电化学迁移等侵入方式穿过管桩混凝土保护层并到达钢筋表面. 一旦钢筋表面氯离子浓度达到临界氯离子浓度, 且有足够的水分和氧气存在, 则钢筋表面钝化膜将受到破坏, 钢筋产生锈蚀^[1-2]. 钢筋锈蚀将产生大量的锈蚀产物, 锈蚀产物的体积膨胀将使钢筋混凝土管桩保护层内部形成膨胀应力, 当膨胀应力超过钢筋混凝土管桩保护层的抗拉强度时, 将引起管桩保护层裂缝的产生和扩展^[3-5]. 同时, 氯离子引起的钢筋锈蚀也将造成钢筋有效截面减小, 钢筋与管桩保护层间的黏结退化, 最终导致管桩丧失结构性能^[6-8].

海洋环境中服役的钢筋混凝土管桩的使用寿命可以分为 2 个阶段^[9]: 锈蚀初始阶段和裂缝扩展阶段, 如图 1 所示. 锈蚀初始阶段表示从管桩暴露于海洋环境到管桩中钢筋表面氯离子浓度达到临界氯离

收稿日期: 2013-09-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51178341)

第一作者: 邵伟 (1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为近海岩土工程耐久性. E-mail: shaowei2775@163.com

通讯作者: 李镜培 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土力学及桩基础工程. E-mail: lijpe2773@tongji.edu.cn

子浓度所需要的时间 t_i ; 裂缝扩展阶段表示从钢筋锈蚀到管桩保护层形成贯穿裂缝所需要的时间 t_p . 假定只有海洋环境中的氯离子引起钢筋混凝土管桩中钢筋的锈蚀, 则钢筋混凝土管桩的使用寿命 t_s 可以表示为 $t_s = t_i + t_p$.

目前, 国内外学者已经对氯离子侵蚀普通混凝土构件的使用寿命进行了评估和预测^[4-5, 7, 10-21], 但这些文献几乎均将钢筋锈蚀初始阶段的时间定义为构件的使用寿命, 显然这种假定严重低估了构件的使用寿命. 此外, 由于海洋环境中服役的钢筋混凝土管桩的内、外保护层表面均遭受海水中氯离子的侵蚀, 基于半无限体推导的扩散方程的解析解不适用于具有有限边界的钢筋混凝土管桩. 而且, 目前对海洋环境中服役的钢筋混凝土管桩的使用寿命预测也未见报道.

为此, 本文依据 Fick 第二定律和 Faraday 定律, 分别建立了氯离子在钢筋混凝土管桩中的扩散方程和氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀模型, 并通过确定临界氯离子浓度和钢筋临界锈蚀深度, 分别对锈蚀初始阶段时间和裂缝扩展阶段时间进行了预测, 从而得到了海洋环境中氯离子侵蚀钢筋混凝土管桩的使用寿命.

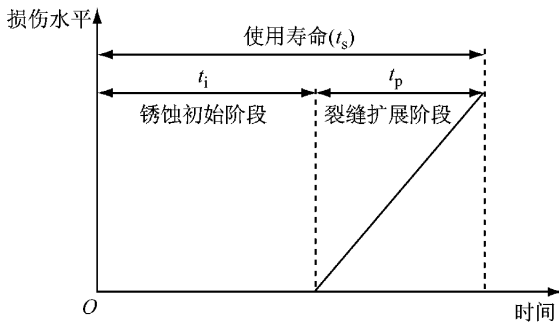


图 1 钢筋混凝土管桩的使用寿命
Fig.1 Service life of RC pipe pile

1 锈蚀初始阶段

1.1 扩散方程及求解

假设钢筋混凝土管桩的内、外半径分别为 a 和 b , 管桩内、外表面氯离子浓度均为 c_s , 假定暴露于海洋环境条件下的管桩为饱和状态, 管桩中的初始氯离子浓度可忽略. 依据 Fick 第二扩散定律, 氯离子在钢筋混凝土管桩中的扩散方程为

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rD \frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式中: c 为氯离子浓度; t 为扩散时间; r 为混凝土管桩的径向半径, $a \leq r \leq b$; D 为氯离子扩散系数.

根据假定, 式(1)对应的初始和边界条件可以表示为

$$\begin{cases} c(r, 0) = 0, & (t = 0, a \leq r \leq b) \\ c(a, t) = c_s, & (t > 0, r = a) \\ c(b, t) = c_s, & (t > 0, r = b) \end{cases} \quad (2)$$

式(1)的解为

$$c(r, t) = c_s \left(1 - \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\alpha_n a) U_0(\alpha_n r)}{J_0(\alpha_n a) + J_0(\alpha_n b)} e^{-\alpha_n^2 D t} \right) \quad (3)$$

式中: $U_0(\alpha_n r) = J_0(\alpha_n r) Y_0(\alpha_n b) - J_0(\alpha_n b) Y_0(\alpha_n r)$; J_0 和 Y_0 分别为第一类和第二类零阶 Bessel 函数; α_n 为方程 $U_0(\alpha_n a) = 0$ 的根.

1.2 临界氯离子浓度

为了求得氯离子扩散到钢筋表面并积聚到临界浓度所需的时间, 首先需要确定临界氯离子浓度. 临界氯离子浓度通常可以用自由氯离子浓度、氯离子浓度与氢氧根离子浓度的比值和氯离子总含量(与水泥质量的百分比)等 3 种方法来表示. 而基于自由氯离子浓度的临界氯离子浓度表示方法受到了广泛的质疑, 这是因为钢筋钝化膜的破坏, 引起钢筋周围 pH 值下降, 进而使得结合氯离子得到释放, 重新形成自由氯离子; 氯离子浓度与氢氧根离子浓度的比值也不能很好地表示临界氯离子浓度, 因为水泥的水化会使钢筋周围形成水化产物膜, 而这种表示方法忽略了水泥的这种抑制作用, 此外, 这种表示方法并没有考虑氯离子的结合能力对氢氧根离子浓度的依赖性. 利用氯离子总含量表示临界氯离子浓度是最有利且使用最广泛的表示方法, 这是因为氯离子总含量比较容易确定, 且包含了结合氯离子的侵蚀风险和水泥水化产物的抑制作用^[22-23].

根据氯离子在管桩中的扩散方程可得, t 时间内单位长度钢筋混凝土管桩中的氯离子总质量为

$$m_t = 2\pi \int_0^t \int_a^b \frac{\partial c}{\partial t} r dr dt \quad (4)$$

设单位长度的钢筋混凝土管桩所用的水泥质量为 m_c , 则临界氯离子质量分数 w_{crit} 为

$$w_{crit} = \frac{m_t}{m_c} \times 100\% \quad (5)$$

联合式(3)、式(4)和式(5), 可解得钢筋锈蚀初始阶段时间 t_i .

2 裂缝扩展阶段

2.1 临界锈蚀深度

为了能够准确评估和预测裂缝扩展阶段的时间

间,首先需要确定保护层完全开裂时钢筋的临界锈蚀深度. 钢筋锈蚀产物的膨胀模型如图 2 所示. 设钢筋的初始直径为 d , 钢筋保护层厚度为 h , 将钢筋保护层视为厚壁圆筒, 圆筒的内半径为 $r_0=d/2$, 外半径为 $r_c=d/2+h$, 由于圆筒的轴对称性, 设保护层的径向弥散裂缝向保护层外围扩展相同距离, 设裂缝前端距钢筋中心的距离为 r_i , 在 $r=r_i$ 处, 保护层达到拉应变临界状态. 设保护层的抗拉强度为 f_t , 弹性模量为 E_0 , 忽略钢筋锈蚀对抗拉强度和弹性模量的影响, 则临界拉应变 ϵ_{cr} 可以表示为 $\epsilon_{cr}=f_t/E_0$, 且当 $r_i=r_c$ 时, 保护层完全开裂.

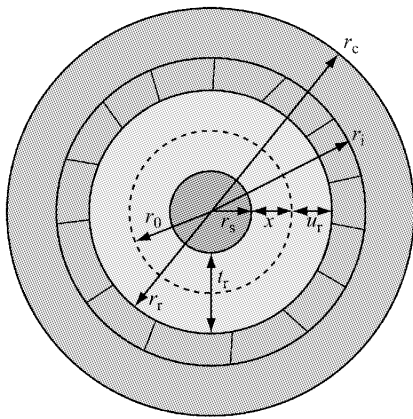


图 2 锈蚀产物的膨胀模型

Fig.2 Corrosion-induced rust expansion model

假定钢筋均匀锈蚀, 钢筋锈蚀深度为 x , 则锈蚀后钢筋的半径为 $r_s=r_0-x$, 对应的单位长度钢筋的体积锈蚀量为

$$\Delta V_s = \pi(r_0 - r_s) = \pi(2r_0x - x^2) \quad (6)$$

则对应的锈蚀产物的体积为

$$\Delta V_r = \alpha \Delta V_s = \alpha(2\pi r_0x - \pi x^2) \quad (7)$$

式中: α 为锈蚀产物与原钢筋的体积比, 即锈蚀产物的体积膨胀率.

设钢筋表面锈蚀产物层的厚度为 t_r , 则锈蚀产物层边界距钢筋中心的距离为 $r_r=r_s+t_r$, 则锈蚀产物的径向位移为 $u_r(r_0)=r_r-r_0$. 考虑到部分锈蚀产物在裂缝扩展过程中将渗透和扩散到锈胀裂缝中, 因此, 需要确定锈胀裂缝中的钢筋锈蚀产物量. 锈蚀产物边界周围的总裂缝宽度为 $\sum w = 2\pi r_0 \epsilon_\theta(r_0)$, 其中: $\epsilon_\theta(r_0)$ 为锈蚀产物边界的切向应变, $\epsilon_\theta(r_0) = u_r(r_0)/r_0$, 则锈胀裂缝内的锈蚀产物的总体积为 $\sum w(r_i - r_r)/2$, 因而可得锈蚀产物的总体积为

$$\Delta V_r = \pi[t_r(2r_s + t_r) + u_r(r_0)(r_i - r_r)] \quad (8)$$

由式(7)和(8)相等可得

$$t_r = \frac{\alpha(2r_0x - x^2) + x(r_i - r_0 + x)}{r_i + r_0} \quad (9)$$

则锈蚀产物的径向位移为

$$u_r(r_0) = r_r - r_0 = t_r - x = \frac{(\alpha - 1)(2r_0x - x^2)}{r_i + r_0} \quad (10)$$

以外环未开裂部分的保护层作为研究对象, 忽略泊松比的影响, 环向应变为 $\epsilon_\theta(r) = \sigma_\theta(r)/E_0$, 则径向位移为 $u_r(r) = r\epsilon_\theta(r)$. 在 $r=r_i$ 处, 保护层达到拉应变临界状态(ϵ_{cr}), 则在 r ($r_i \leq r \leq r_c$) 处的径向位移为

$$u_r(r) = \frac{f_t}{E_0} r \frac{(r_c/r)^2 + 1}{(r_c/r_i)^2 + 1} \quad (11)$$

对于内环已开裂部分的保护层, 环向应力从 $r=r_i$ 处的 f_t 减小到 $r=r_0$ 处的最小值, 为了计算内环已开裂部分保护层的环向应力分布, 假设式(11)中的径向位移 $u_r(r)$ 在 $r_0 \leq r \leq r_c$ 范围内满足弹性分布, 因而可得在 $r=r_0$ 处的径向位移为

$$u_r(r_0) = \frac{f_t}{E_0} r_0 \frac{(r_c/r_0)^2 + 1}{(r_c/r_i)^2 + 1} \quad (12)$$

由式(10)和(12)相等可得

$$\frac{(\alpha - 1)(2r_0x - x^2)}{r_i + r_0} = \frac{f_t}{E_0} r_0 \frac{(r_c/r_0)^2 + 1}{(r_c/r_i)^2 + 1} \quad (13)$$

式(13)中 r_i 的取值范围为 $r_0 \leq r_i \leq r_c$, 因而根据式(13)可求得对应不同裂缝前端 r_i 的钢筋锈蚀深度. 且当 $r_i=r_c$ 时, 钢筋保护层刚好完全开裂, 此时可认为钢筋混凝土管桩的使用寿命终结, 且对应的锈蚀深度为临界锈蚀深度 x_{cr} .

2.2 裂缝扩展阶段时间

由 Faraday 定律可得钢筋在锈蚀过程中的锈蚀量为^[1, 19]

$$\frac{dM_{loss}}{dt} = \frac{I_{corr} A}{zF} \quad (14)$$

式中: M_{loss} 为钢筋锈蚀量, g; I_{corr} 为腐蚀电流, A; A 为铁离子的摩尔质量 ($A=55.85 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$); z 为化合价, 一般假定 $z=2.5$ (当锈蚀产物的组成成分为 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 时, $z=2.0$, 当锈蚀产物的组成成分为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 时, $z=3.0$); F 为 Faraday 常数 ($F=96,500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$); t 为钢筋锈蚀时间, s.

式(14)可以简化为

$$\frac{dM_{loss}}{dt} = 2.315 \times 10^{-4} I_{corr} \quad (15)$$

设钢筋的初始直径为 d (mm), 选取单位长度钢筋 $L=1.0 \text{ m}$, 则腐蚀电流 I_{corr} 可以表示为

$$I_{corr} = \pi d i_{corr} L = 10^{-5} \pi d i_{corr} \quad (16)$$

式中: i_{corr} 为腐蚀电流密度, $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$. 将式(16)代入式(15)可得钢筋锈蚀量为

$$\Delta M_{\text{loss}} = \sum_{n=1}^i 2.315 \times 10^{-9} \pi d i_{\text{corr},n} \Delta t_n \quad (17)$$

假定钢筋锈蚀过程为均匀锈蚀,设钢筋的密度为 $\rho_s = 7.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,则钢筋锈蚀深度 x 可以表示为

$$x = \frac{\Delta M_{\text{loss}}}{\pi \rho_s d L} = \sum_{n=1}^i 2.949 \times 10^{-10} i_{\text{corr},n} \Delta t_n \quad (18)$$

由式(18)可知,腐蚀电流密度 i_{corr} 是控制钢筋锈蚀过程的唯一影响因素. Liu 和 Weyers^[24] 通过对混凝土内钢筋锈蚀速率、钢筋表面氯离子浓度、温度以及混凝土电阻率进行回归分析,得到了腐蚀电流密度的表达式

$$i_{\text{corr}} = 0.926 \exp[7.98 + 0.777 \ln(1.69c) - \frac{3006}{T} - 1.16 \times 10^{-4} R + 2.24t^{-0.215}] \quad (19)$$

式中: T 为钢筋表面的温度, K; t 为钢筋锈蚀时间, 年; R 为混凝土保护层的电阻值, Ω , 其值可以表示为^[25]

$$R = \exp[8.03 - 0.549 \ln(1 + 1.69c)] \quad (20)$$

令钢筋锈蚀深度 x 等于临界锈蚀深度 x_{cr} , 即可求得裂缝扩展阶段时间 t_p . 当钢筋锈蚀初始阶段时间 t_i 和裂缝扩展阶段时间 t_p 均为已知后, 即可得钢筋混凝土管桩的使用寿命 t_s .

3 寿命预测结果与试验验证

设钢筋混凝土管桩的内、外半径分别为 $a = 200 \text{ mm}$ 和 $b = 300 \text{ mm}$, 壁厚为 100 mm , 混凝土弹性模量为 $E_0 = 38 \text{ GPa}$, 保护层抗拉强度为 $f_t = 2.2 \text{ MPa}$, 钢筋初始直径为 $d = 10 \text{ mm}$, 管桩保护层厚度为 $h = 45 \text{ mm}$, 钢筋表面的温度为 $T = 296 \text{ K}$, 管桩内、外表面氯离子浓度为 $c_s = 0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. 根据文献^[26] 中的试验结果, 氯离子在管桩保护层中的扩散系数可取为 $D = 0.76 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 单位长度(1 m)的钢筋混凝土管桩所用的水泥质量为 $m_c = 72.38 \text{ kg}$. 根据文献^[27], 可取氯离子临界质量分数为 $c_{\text{crit}} = 0.4\%$. 根据文献^[28], 锈蚀产物的体积膨胀率可取 $\alpha = 2.96$. 通过计算可得, 钢筋锈蚀初始阶段时间 t_i 和裂缝扩展阶段时间 t_p 分别为: $t_i = 20.2 \text{ 年}$ 和 $t_p = 2.7 \text{ 年}$, 则海洋环境中氯离子侵蚀钢筋混凝土管桩的使用寿命为: $t_s = 22.9 \text{ 年}$.

为验证所预测寿命的准确性, 引用文献^[4] 中的试验结果与预测结果进行比较. 由于缺少自然环境下钢筋混凝土管桩的钢筋锈蚀初始阶段 t_i 和裂纹扩展阶段 t_p 的试验和检测数据, 因而, 只能通过对

计算得到的临界钢筋锈蚀深度与试验结果进行比较, 来验证所预测寿命的准确性.

由式(13)可知, 临界锈蚀深度主要与体积膨胀率、钢筋初始直径、保护层厚度、保护层弹性模量和抗拉强度等有关, 其中, 体积膨胀率的取值范围为 $\alpha = 1.70 \sim 6.15$, 但一般取 $\alpha = 2.00 \sim 3.00$. 文献^[4] 中的钢筋的初始直径 $d = 16 \text{ mm}$, 保护层厚度 $h = 27 \text{ mm}$, 保护层弹性模量 $E_0 = 27 \text{ GPa}$, 保护层抗拉强度 $f_t = 3.3 \text{ MPa}$. 当 $\alpha = 2.00$ 时, 由式(13)计算得到的钢筋临界锈蚀深度 $x_{\text{cr}} = 53.1 \text{ } \mu\text{m}$; 当 $\alpha = 3.00$ 时, 计算得到的临界锈蚀深度 $x_{\text{cr}} = 26.5 \text{ } \mu\text{m}$, 文献^[4] 中试验观测的临界锈蚀深度 $x_{\text{cr}} = 31.4 \text{ } \mu\text{m}$, 可见预测值与试验结果吻合较好, 从而说明所预测使用寿命的准确性.

4 影响因素分析

海洋环境中钢筋混凝土管桩的使用寿命主要受表面氯离子浓度、扩散系数、保护层厚度、钢筋直径、体积膨胀率和保护层抗拉强度与弹性模量的比值等因素的影响. 取如下计算参数进行分析: $a = 200 \text{ mm}$, $b = 300 \text{ mm}$, $D = 0.76 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $c_s = 0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $w_{\text{crit}} = 0.4\%$, $d = 10 \text{ mm}$, $h = 45 \text{ mm}$, $E_0 = 38 \text{ GPa}$, $f_t = 2.2 \text{ MPa}$, $T = 296 \text{ K}$, $\alpha = 2.96$.

4.1 表面氯离子浓度

图 3 为管桩使用寿命与表面氯离子浓度之间的关系曲线. 从图 3 中可以看出: 随着表面氯离子浓度的增加, 管桩寿命急剧减小. 这是因为表面氯离子浓度的增加, 促使管桩内外的氯离子浓度梯度增大, 加快了氯离子在管桩中的扩散, 从而减小了钢筋锈蚀初始阶段的时间, 加速了管桩寿命的终结. 因而, 可以通过对管桩表面涂抹环氧树脂等防水材料来减小管桩的表面氯离子浓度, 从而延长管桩的使用寿命.

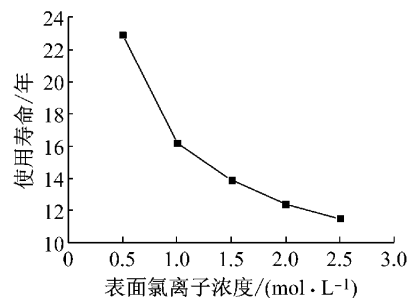


图 3 使用寿命与表面氯离子浓度的关系

Fig. 3 Relationship between service life and surface chloride ion concentration

4.2 扩散系数

图4为管桩使用寿命与氯离子扩散系数之间的关系曲线.从图4中可以看出:随着扩散系数的增大,管桩寿命急剧减小.这是因为扩散系数的增大,加快了氯离子在管桩中的扩散,缩短了钢筋锈蚀初始阶段的时间,从而减小了管桩的耐久性寿命.通过增加管桩保护层的密实度等方法可以减小管桩的扩散系数,延长管桩的使用寿命.

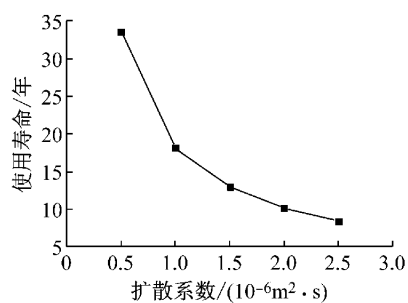


图4 使用寿命与扩散系数的关系

Fig.4 Relationship between service life and diffusion coefficients

4.3 保护层厚度

图5为管桩使用寿命与保护层厚度之间的关系曲线.从图5中可以看出:随着保护层厚度的增加,管桩使用寿命显著增加.这是因为保护层厚度的增加,延长了钢筋锈蚀初始阶段的时间,同时促使钢筋的临界锈蚀量增大,因而,延长了管桩的使用寿命.因此,增大保护层厚度是延长管桩使用寿命非常有效的方法,其不仅能够防止钢筋锈蚀,也能有效延缓锈胀裂缝的产生和扩展.

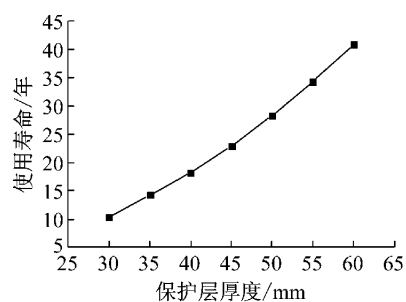


图5 使用寿命与保护层厚度的关系

Fig.5 Relationship between service life and cover thicknesses

4.4 钢筋直径

图6为管桩使用寿命与钢筋直径之间的关系曲线.从图6中可以看出:随着钢筋直径的增加,管桩使用寿命减小.这是因为钢筋直径的增加,减小了钢筋的临界锈蚀深度,从而减小了裂缝扩展阶段的时

间.因此,在满足管桩承载力的条件下,选用直径较小的钢筋可以适度地延长管桩的使用寿命.

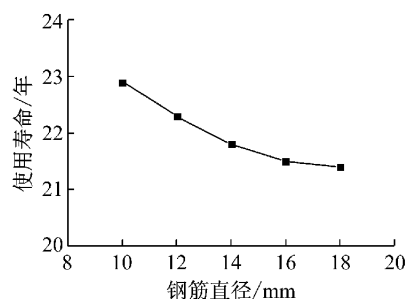


图6 使用寿命与钢筋直径的关系

Fig.6 Relationship between service life and steel diameters

4.5 体积膨胀率

图7为管桩使用寿命与锈蚀产物的体积膨胀率之间的关系曲线.从图7中可以看出:随着体积膨胀率的增加,管桩使用寿命减小.这是因为锈蚀产物体积膨胀率的增加,减小了钢筋的临界锈蚀量,从而减小了裂缝扩展阶段的时间.因而,可以通过减小钢筋锈蚀过程中的氧气和水分的供应,来减小钢筋的氧化水平,进而延长管桩的使用寿命.

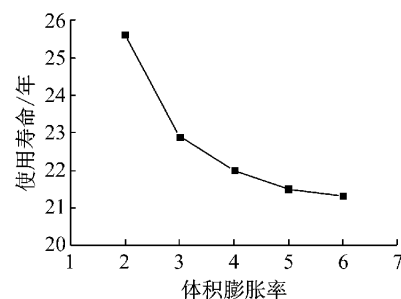


图7 使用寿命与体积膨胀率的关系

Fig.7 Relationship between service life and volume expansive ratios

4.6 抗拉强度与弹性模量的比值

图8给出了管桩使用寿命与保护层抗拉强度与弹性模量的比值之间的关系曲线.从图8中可以看出:随着保护层抗拉强度与弹性模量的比值的增加,管桩使用寿命增加,但增加幅度不大.可见,通过增大管桩的保护层强度,并不能显著地延长管桩的使用寿命.

由上述分析结果可知,表面氯离子浓度、扩散系数和保护层厚度对管桩的使用寿命影响均较大,因而,可根据实际情况,通过对管桩表面涂抹环氧树脂等防水材料,或采用更加密实的混凝土,或适度地增大保护层厚度等措施来延长管桩的使用寿命.在实

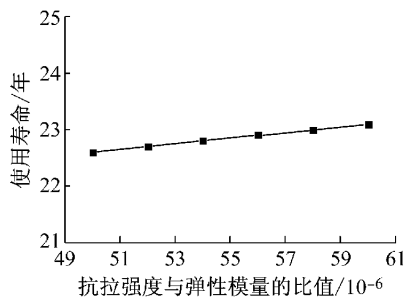


图 8 使用寿命与抗拉强度与弹性模量的比值的关系

Fig. 8 Relationship between service life and ratios of tensile strength to elastic modulus

际工程中,具体采用何种措施,可结合实际工程加以综合考虑。

5 结论

(1) 表面氯离子浓度和扩散系数的增大,加快了氯离子在管桩中的扩散,缩短了钢筋锈蚀初始阶段的时间,减小了管桩的使用寿命。

(2) 管桩保护层厚度的增加,延长了钢筋锈蚀初始阶段的时间,同时促使钢筋的临界锈蚀量增大,延长了管桩的使用寿命。

(3) 钢筋直径和锈蚀产物体积膨胀率的增大,减小了钢筋的临界锈蚀深度,从而减小了管桩的使用寿命。

(4) 随着保护层抗拉强度与弹性模量的比值的增加,管桩使用寿命增加,但增加幅度不大。因而,增大管桩混凝土保护层强度,并不能显著地延长管桩的使用寿命。

参考文献:

- [1] Chen D, Mahadevan S. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30: 227.
- [2] Guzman S, Galvez J C, Sancho J M. Modelling of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete by an embedded cohesive crack finite element [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, 93: 92.
- [3] Bazant Z P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures-theory[J]. *Journal of the Structural Division*, 1979, 105(6):1137.
- [4] Liu Y, Weyers R E. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures[J]. *ACI Materials Journal*, 1998, 95(6):675.
- [5] El Maaddawy T, Soudki K. A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(3): 168.
- [6] Martin-Perez B, Zibara H, Hooton R D, *et al.* A study of the effect of chloride binding on service life predictions [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(8): 1215.
- [7] Bhargava K, Ghosh A K, Mori Yasuhiro, *et al.* Analytical model for time to cover cracking in RC structures due to rebar corrosion[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2006, 236(11): 1123.
- [8] Bhargava K, Ghosh A K, Mori Yasuhiro, *et al.* Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete-Analytical and empirical models[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2007, 237(11): 1140.
- [9] Reale T, O'connor A. A review and comparative analysis of corrosion-induced time to first crack models[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 36: 475.
- [10] Morinaga S. Prediction of service life of reinforced concrete buildings based on the corrosion rate of reinforcing steel [C]// 5th International Conference on Durability of Building Materials and Components. Brighton: Taylor & Francis, 1990: 5-16.
- [11] Maage M, Helland S, Poulsen E, *et al.* Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment [J]. *ACI Materials Journal*, 1996, 93(6): 602.
- [12] Prezzi M, Geyskens S, Monteiro P J M. Reliability approach to service life prediction of concrete exposed to marine environments[J]. *ACI Materials Journal*, 1996, 93(6): 544.
- [13] Liang M T, Wang K L, Liang C H. Service life prediction of reinforced concrete structures [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(9): 1411.
- [14] 田俊峰,潘德强,赵尚传. 海工高性能混凝土抗氯离子侵蚀耐久寿命预测[J]. *中国港湾建设*, 2002(2): 1.
TIAN Junfeng, PAN Deqiang, ZHAO Shangchuan. Prediction of durable life of HPC structures resisting chloride ion penetration in marine environment [J]. *China Harbour Engineering*, 2002(2): 1.
- [15] 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.
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.
- [16] 宋玉普,宋立元,赵敏. 混凝土海洋平台抗氯离子侵蚀耐久寿命预测试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2005, 45(5): 707.
SONG Yupu, SONG Liyuan, ZHAO Min. Experimental study of durable life prediction resisting chloride ion penetration for concrete offshore platforms[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2005, 45(5): 707.
- [17] 马亚丽,张爱林. 基于规定可靠指标的混凝土结构氯离子侵蚀耐久寿命预测[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(2): 36.
MA Yali, ZHANG Ailin. Durablity life prediction of concrete structure based on the regulated reliability index under chloride environment[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(2): 36.
- [18] 付燕弟,范宏,王彭刚. 氯离子环境下钢筋混凝土结构的使用寿命预测[J]. *青岛理工大学学报*, 2011, 32(4): 18.