

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.06.014

锈蚀损伤混凝土管桩水平承载性状时变分析

邵伟^{1,2}, 李镜培^{1,2}, 陈海兵^{1,2}, 李林^{1,2}

(1.岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学),200092 上海;2. 同济大学 地下建筑与工程系, 200092 上海)

摘要:为研究锈蚀损伤混凝土管桩的水平承载性状,依据 Fick 第二定律,建立了氯离子在混凝土管桩中的扩散方程,并结合初始和边界条件,得到扩散方程的解析解.依据厚壁圆筒模型,推导了钢筋混凝土管桩保护层锈胀开裂时的钢筋临界锈蚀深度.基于 Faraday 定律,对钢筋混凝土管桩保护层锈胀开裂时间进行了预测.并在此基础上,通过引入桩身抗弯刚度折减系数对海洋环境下锈蚀损伤钢筋混凝土管桩的桩身抗弯刚度的衰减规律进行了探讨,进而对海洋环境下锈蚀损伤钢筋混凝土管桩的水平承载性状的时变特性进行了分析.结果表明:海洋环境中氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀对钢筋混凝土管桩的水平承载性状有明显影响.随着暴露时间的延长,桩身抗弯刚度呈非线性衰减,桩身水平位移和桩身负剪力最大值逐渐增大,桩身弯矩逐渐减小.

关键词:水平承载桩;氯离子;锈蚀损伤;海洋环境;时变性状

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)06-0077-05

Time-dependant behavior analysis of laterally loaded corrosion damaged RC pipe piles

SHAO Wei^{1,2}, LI Jingpei^{1,2}, CHEN Haibing^{1,2}, LI Lin^{1,2}

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

Abstract: To investigate the behavior of laterally loaded corrosion damaged reinforced concrete (RC) pipe pile, the governing equation of chloride diffusion into RC pipe pile was established based on Fick's second law. Considering initial and boundary conditions, the analytical solution of chloride diffusion equation was presented. The critical corrosion penetration of reinforcing steel corresponding to cracking of concrete cover occurs was presented based on thick-walled cylinder model. Based on Faraday's law, the time for corrosion-induced cover cracking in RC pipe pile was estimated. Then the attenuation law of flexural stiffness of corrosion damaged RC pipe pile exposed to marine environments was investigated by introducing the reduction factor of flexural stiffness. The time-dependent behavior of laterally loaded corrosion damaged RC pipe piles exposed to marine environments was further analyzed. The analysis results show that the chloride-induced reinforcement corrosion had a significant effect on the behavior of laterally loaded RC pipe piles exposed to marine environments. The flexural stiffness of RC pipe pile decreased nonlinearly with the increase of exposure time. The maximum negative shear force and the lateral deflection increased with the increase of exposure time, while the bending moment decreased.

Keywords: laterally loaded pile; chloride ions; corrosion damage; marine environments; time-dependent behavior

服役于海洋环境中的桩基不仅承受着风、波浪和水流等水平荷载的作用,而且长期暴露于严

重的氯离子侵蚀环境中.氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀能够导致桩身结构强度的劣化、抗弯刚度的减小、以及水平荷载作用下桩基长期抗力的不断衰减.目前,国内外学者已经对水平承载桩的工作性状进行了大量研究^[1-5],并提出了众多水平承载桩与土体相互作用的计算理论与分析方法.但

收稿日期: 2014-07-01.
基金项目: 国家自然科学基金(51178341).
作者简介: 邵伟(1984—),男,博士研究生;
李镜培(1963—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 李镜培, lij2773@tongji.edu.cn.

上述研究主要针对未锈蚀损伤桩的水平承载性状,而对服役于海洋环境中锈蚀损伤桩的水平承载性状的研究还未见报道.为此,本文通过引入桩身抗弯刚度折减系数对海洋环境下锈蚀损伤钢筋混凝土管桩的桩身抗弯刚度的衰减规律进行探讨,进而对海洋环境下锈蚀损伤钢筋混凝土管桩的水平承载性状的时变特性进行分析.

1 氯离子在管桩中的扩散

依据 Fick 第二扩散定律,可得氯离子在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 为暴露时间 t 时深度 r 处混凝土保护层中的氯离子质量浓度, kg/m^3 ; D 为氯离子扩散系数, m^2/s . 式(1)对应的初始和边界条件可表示为

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

式中: a 和 b 分别为混凝土管桩的内、外半径; C_a 和 C_b 分别为管桩内、外表面氯离子质量浓度. 结合初始和边界条件可得式(1)的解为

$$C(r, t) = \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[C_a J_0(\alpha_n b) - C_b J_0(\alpha_n a)] J_0(\alpha_n a) U_0(\alpha_n r)}{J_0^2(\alpha_n a) - J_0^2(\alpha_n b)} \cdot e^{-\alpha_n^2 D t} + \frac{C_a \ln(b/r) + C_b \ln(r/a)}{\ln(b/a)}. \quad (3)$$

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.

2 钢筋临界锈蚀深度

设管桩保护层厚度为 c , 钢筋初始直径为 d_0 , 钢筋与混凝土界面存在一层孔隙区, 假定孔隙区均匀分布且厚度为 δ_0 , 见图 1. 当钢筋发生锈蚀并填满孔隙区后, 钢筋锈蚀产物将对界面处混凝土保护层产生膨胀应力, 膨胀应力将对界面处混凝土保护层产生拉应力和拉应变. 当界面处混凝土保护层中的环向拉应力达到混凝土保护层的抗拉强度时, 混凝土保护层产生裂缝. 将混凝土保护层视为厚壁圆筒, 在膨胀应力 p_r 作用下, 钢筋与锈蚀产物界面处混凝土保护层产生径向位移 δ_c 为^[6]

$$\delta_c = \frac{r_0}{E_{ef}} \left[\frac{(r_0 + c)^2 + r_0^2}{(r_0 + c)^2 - r_0^2} + \nu_c \right] p_r. \quad (4)$$

式中: δ_c 为混凝土保护层的径向位移; r_0 为圆筒的内径, $r_0 = d_0/2 + \delta_0$; E_{ef} 为混凝土保护层的有效弹性模量, $E_{ef} = E_c/(1 + \phi_c)$, 其中: E_c 为混凝土弹性

模量; ϕ_c 为混凝土保护层的徐变系数; ν_c 为混凝土保护层的泊松比. 随着钢筋的锈蚀, 单位长度钢筋锈蚀产物膨胀所引起的体积增加量为

$$\frac{M_r}{\rho_r} - \frac{M_{\text{loss}}}{\rho_s} = \pi [d_0(\delta_0 + \delta_c) + (\delta_0 + \delta_c)^2] \approx \pi d_0(\delta_0 + \delta_c). \quad (5)$$

式中: ρ_r 和 ρ_s 分别为锈蚀产物和钢筋的密度, M_r 和 M_{loss} 分别为锈蚀产物和锈蚀钢筋的质量. 设 α_v 为体积膨胀率, 由式(4)、(5), 可得径向膨胀应力 p_r 为

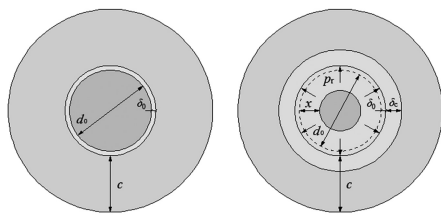
$$p_r = \frac{E_{ef}}{(\gamma + 1 + \nu_c)} \left[\frac{M_{\text{loss}}}{\rho_s} \frac{(\alpha_v - 1)}{\pi d_0 r_0} - \frac{\delta_0}{r_0} \right]. \quad (6)$$

其中: $\gamma = \frac{2r_0^2}{c(2r_0 + c)}$. 研究表明: 混凝土保护层锈胀开裂时的临界锈胀应力 p_{cr} 与钢筋直径 d_0 、混凝土保护层抗拉强度 f_{ct} 及保护层厚度 c 有关, 可表示为

$$p_{cr} = 2cf_{ct}/d_0. \quad (7)$$

由式(6)、(7)可得混凝土保护层锈胀开裂时钢筋临界锈蚀深度 x_{cr} 为

$$x_{cr} = \frac{M_{\text{loss}}}{\pi \rho_s d_0} = \frac{r_0}{(\alpha_v - 1)} \left[\frac{2c(\gamma + 1 + \nu_c)}{d_0} \frac{f_{ct}}{E_{ef}} + \frac{\delta_0}{r_0} \right]. \quad (8)$$



(a) 钢筋锈蚀前 (b) 钢筋锈蚀后

图 1 厚壁圆筒模型

3 保护层锈胀开裂时间

均匀锈蚀条件下, 由 Faraday 定律可得钢筋在锈蚀过程中的锈蚀量为

$$\frac{dM_{\text{loss}}}{dt} = \frac{I_{\text{corr}} M}{nF}. \quad (9)$$

式中: M_{loss} 为钢筋锈蚀量, g; t 为锈蚀时间, s; M 为铁离子的原子量 ($M = 55.85 \text{ g/mol}$); n 为化合价, 可取 $n = 2.5$; F 为 Faraday 常数 ($F = 96500 \text{ C/mol}$); I_{corr} 为腐蚀电流, A. 以单位长度管桩作为研究对象 ($L = 1 \text{ m}$), 则腐蚀电流 (I_{corr}) 可表示为

$$I_{\text{corr}} = \pi d_0 i_{\text{corr}} L = 10^{-5} \pi d_0 i_{\text{corr}}. \quad (10)$$

式中: i_{corr} 为腐蚀电流密度, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. 将式(10)代入式(9)可得钢筋锈蚀量为

$$M_{\text{loss}} = 2.315 \times 10^{-9} \pi d_0 \int_0^t i_{\text{corr}}(t) dt. \quad (11)$$

设钢筋的密度为 $\rho_s = 7.85 \text{ g/cm}^3$, 则钢筋锈蚀深度 (x) 可表示为

$$x = \frac{M_{\text{loss}}}{\pi \rho_s d_0 L} = 2.949 \times 10^{-10} \int_0^t i_{\text{corr}}(t) dt. \quad (12)$$

当钢筋锈蚀深度 x 达到临界锈蚀深度 x_{cr} 时, 管桩混凝土保护层锈胀开裂时间 t_{cr} 可通过式 (13) 得到

$$\frac{r_0}{(\alpha_v - 1)} \left[\frac{2c(\gamma + 1 + v_c)}{d_0} \frac{f_{\text{ct}}}{E_{\text{ef}}} + \frac{\delta_0}{r_0} \right] = 2.949 \times 10^{-10} \int_0^t i_{\text{corr}}(t) dt. \quad (13)$$

Liu 等^[7] 通过试验研究发现: 钢筋腐蚀电流密度与钢筋表面氯离子质量浓度、温度以及混凝土电阻率相关, 并通过回归分析得到了其表达式

$$i_{\text{corr}} = 0.926 \exp(7.98 + 0.777 \ln(1.69C) - \frac{3\,006}{T} - 1.16 \times 10^{-4} R + 2.24t^{-0.215}). \quad (14)$$

式中: T 为钢筋表面温度, K; t 为钢筋锈蚀时间, a; R 为混凝土保护层电阻值, 其值可表示为^[8]

$$R = \exp[8.03 - 0.549 \ln(1 + 1.69C)]. \quad (15)$$

4 桩身抗弯刚度折减系数

将桩视为弹性梁, 基于梁的弯曲理论和 Winkler 地基模型, 水平承载桩的挠曲微分方程可表示为

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + Ky = 0. \quad (16)$$

式中: EI 为桩身抗弯刚度, $EI = 0.85E_c I$, 其中 E_c 为混凝土弹性模量; I 为桩身截面惯性矩; y 为桩身水平位移; z 为自地面以下的深度; K 为水平地基反力, $K = 2k_h b$; 其中 b 为桩身外半径, k_h 为桩侧土的水平地基反力系数, 可假定 k_h 沿深度呈线性增长, 即 $k_h = mz$, 其中: m 为水平地基反力系数的比例系数. 由于 k_h 为非常数, 为方便求解, 可采用文献[9] 中有限差分法对方程 (16) 进行数值解答. 考虑氯离子引起的钢筋锈蚀对钢筋混凝土管桩抗弯刚度的影响, 引入桩身抗弯刚度折减系数 (η) 对未锈蚀损伤桩的抗弯刚度 (EI) 进行修正:

$$E_p I_p = \eta EI. \quad (17)$$

式中: $E_p I_p$ 为锈蚀损伤桩的桩身抗弯刚度; η 为钢筋锈蚀引起的桩身抗弯刚度折减系数, 其值为^[10]

$$\eta = \frac{1}{A} \sum A_i \eta_i. \quad (18)$$

式中: A 为受拉钢筋的总截面面积; A_i 为第 i 根钢筋锈蚀后的截面面积; η_i 为第 i 根钢筋锈蚀引起

的刚度折减系数. 当管桩混凝土保护层无锈胀裂缝时, $\eta_i = 1.0$; 当管桩混凝土保护层出现锈胀裂缝时, 其值为^[10]

$$\eta_i = \begin{cases} 1.0, & 0 \leq x_i < 0.1; \\ (3.7 - 7x_i)/3, & 0.1 \leq x_i < 0.25; \\ 0.65, & x_i \geq 0.25. \end{cases} \quad (19)$$

式中 x_i 为第 i 根钢筋的锈蚀深度, mm.

5 单桩水平承载性状时变分析

5.1 计算条件及参数

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 , 桩身为 C80 高强混凝土, 混凝土弹性模量为 $E_c = 38 \text{ GPa}$, 主筋为 12 根直径均为 $d_0 = 10 \text{ mm}$ 的光圆钢筋, 混凝土抗拉强度为 $f_{\text{ct}} = 2.22 \text{ MPa}$, 混凝土的徐变系数为 $\phi_c = 2.0$, 混凝土泊松比为 $v_c = 0.20$, 锈蚀产物的体积膨胀率为 $\alpha_v = 3.0$, 钢筋的弹性模量为 200 GPa , 桩身配筋率为 $\rho_g = 0.6\%$, 管桩保护层厚度为 $c = 45 \text{ mm}$, 孔隙区厚度为 $\delta_0 = 12.5 \text{ }\mu\text{m}$, 未锈蚀损伤桩的桩身初始抗弯刚度为 $EI = 1.29 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$. 桩头自由, 桩身嵌入土体深度为 20 m , 地基土为均质淤泥质土, 桩侧土的水平地基反力系数的比例系数 $m = 3.0 \text{ MN/m}^4$. 地面处管桩桩顶所受荷载为: 水平荷载 $H_0 = 100 \text{ kN}$, 弯矩 $M_0 = 300 \text{ kN} \cdot \text{m}$. 在计算中考虑两种不同的暴露条件: 假设管桩位于海岸边 100 m 处, 此时管桩内、外表面氯离子质量浓度为 $C_a = C_b = 4.5 \text{ kg/m}^3$; 假设管桩位于海水中, 此时管桩内、外表面氯离子质量浓度为 $C_a = C_b = 9.0 \text{ kg/m}^3$. 假定氯离子扩散系数 $D = 1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 临界氯离子质量浓度为 $C_{\text{crit}} = 1.2 \text{ kg/m}^3$, 钢筋表面温度为 $T = 296 \text{ K}$.

5.2 桩身抗弯刚度折减系数的时变特性

图 2 给出了管桩在 $C_a = C_b = 4.5 \text{ kg/m}^3$ 和 $C_a = C_b = 9.0 \text{ kg/m}^3$ 两种不同暴露条件下桩身抗弯刚度折减系数随暴露时间的变化曲线. 两种暴露条件下的管桩桩身抗弯刚度折减系数呈现相似的衰减规律, 对比暴露条件 $C_a = C_b = 9.0 \text{ kg/m}^3$, 暴露条件为 $C_a = C_b = 4.5 \text{ kg/m}^3$ 的管桩桩身抗弯刚度表现为延迟衰减, 在 $C_a = C_b = 4.5 \text{ kg/m}^3$ 和 $C_a = C_b = 9.0 \text{ kg/m}^3$ 两种不同暴露条件下管桩中钢筋锈蚀初始时间为 18.0 a 和 12.1 a . 当暴露时间小于管桩保护层锈胀开裂时间时, 管桩桩身抗弯刚度保持不变; 随着暴露时间的延长, 抗弯刚度

急剧下降,之后,抗弯刚度折减系数近似呈线性衰减.当刚度折减系数减小至 0.6 时,暴露条件分别为 $C_a = C_b = 4.5 \text{ kg/m}^3$ 和 $C_a = C_b = 9.0 \text{ kg/m}^3$ 的管桩所需暴露时间分别为 45 a 和 30 a.当暴露时间为 90 a 时,暴露条件分别为 $C_a = C_b = 4.5 \text{ kg/m}^3$ 和 $C_a = C_b = 9.0 \text{ kg/m}^3$ 的管桩桩身抗弯刚度系数分别减小为 0.48 和 0.37.

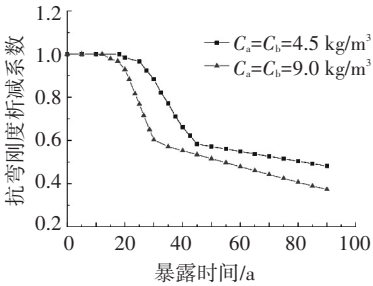


图 2 抗弯刚度折减系数随暴露时间的变化曲线

5.3 桩身水平位移的时变特性

图 3 分别给出了管桩在 $C_a = C_b = 4.5 \text{ kg/m}^3$ 和 $C_a = C_b = 9.0 \text{ kg/m}^3$ 两种不同暴露条件下的桩身水平位移分布.桩身水平位移最大值出现在桩顶端,随着埋置深度的增加,受到桩侧土抗力的作用,桩身水平位移逐渐减小,距地面约 5.0 m 处出现第一位移零点,随着暴露时间的延长,桩身刚度损伤逐渐加剧,桩身第一位移零点位置逐渐上移,桩身的稳定性降低.此外,随着暴露时间的延长,相同深度位置处桩身水平位移逐渐增大.当暴露条件为 $C_a = C_b = 4.5 \text{ kg/m}^3$ 时,暴露时间分别为 0、30、60 和 90 a 的桩顶水平位移分别为 45.7、48.6、61.7 和 65.9 mm,对比无锈蚀损伤桩 ($t = 0$),暴露时间分别为 30、60 和 90 a 的管桩桩顶水平位移分别增加了 6.3%、35.0% 和 44.2%.当暴露条件为 $C_a = C_b = 9.0 \text{ kg/m}^3$ 时,暴露时间分别为 0、30、60 和 90 a 的管桩桩顶水平位移分别为 45.7、58.9、66.2 和 75.1 mm,对比无锈蚀损伤桩,暴露时间分别为 30、60 和 90 a 的管桩桩顶水平位移分别增加了 28.9%、44.9% 和 64.3%.

5.4 桩身剪力分布的时变特性

图 4 分别给出了管桩在 $C_a = C_b = 4.5 \text{ kg/m}^3$ 和 $C_a = C_b = 9.0 \text{ kg/m}^3$ 两种不同暴露条件下的桩身剪力分布.随着埋置深度的增加,受到桩侧土抗力的作用,桩身剪力逐渐减小,距地面约 2.0 m 处出现第一剪力零点,随着埋置深度的进一步增加,桩身产生负剪力,并在距地面约 4.5 m 处出现负剪力最大值.随着暴露时间的延长,在距地面 2.0~4.5 m 范围内,相同深度处的桩身剪力逐渐增大.当暴露条件为 $C_a = C_b = 4.5 \text{ kg/m}^3$ 时,暴露

时间分别为 0、30、60 和 90 a 的管桩桩身最大负剪力分别为 -95.7、-96.7、-102.6 和 -104.2 kN,对比无锈蚀损伤桩,暴露时间分别为 30、60 和 90 a 的管桩桩身最大负剪力分别增大了 1.0%、7.2% 和 8.9%.当暴露条件为 $C_a = C_b = 9.0 \text{ kg/m}^3$ 时,暴露时间分别为 0、30、60 和 90 a 的管桩桩身最大负剪力分别为 -95.7、-101.7、-104.3 和 -108.2 kN,对比无锈蚀损伤桩,暴露时间分别为 30、60 和 90 a 的管桩桩身最大负剪力分别增大了 6.3%、9.0% 和 13.1%.并且随着暴露时间的延长,负剪力最大值点的位置略有上移.

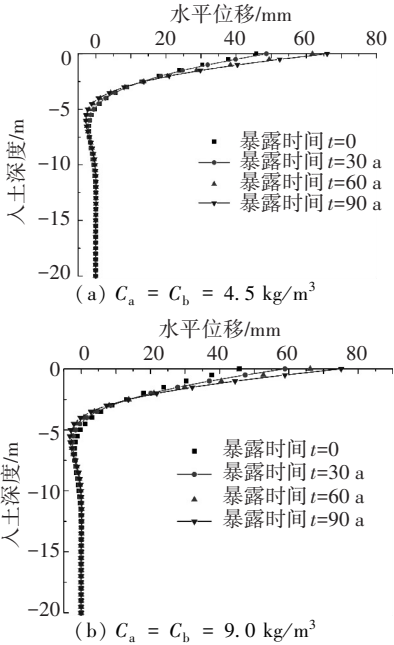


图 3 不同暴露条件下的桩身水平位移分布

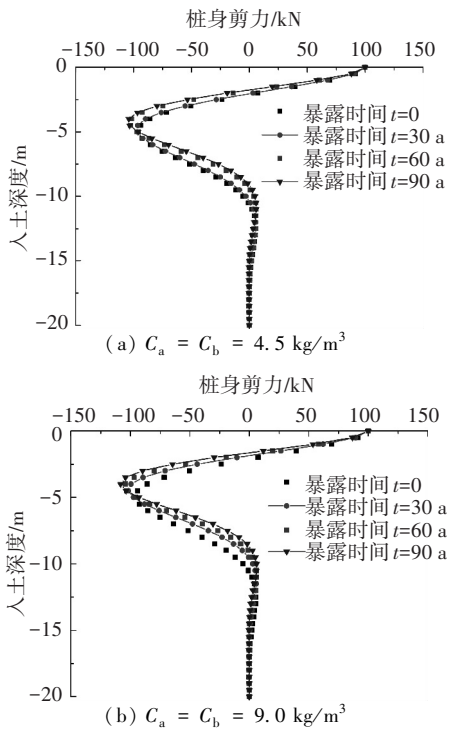


图 4 不同暴露条件下的桩身剪力分布

5.5 桩身弯矩分布的时变特性

图 5 分别给出了管桩在 $C_a = C_b = 4.5 \text{ kg/m}^3$ 和 $C_a = C_b = 9.0 \text{ kg/m}^3$ 两种不同暴露条件下的桩身弯矩分布. 随着埋置深度的增加, 在距地面 1.5~2.5 m 范围内, 桩身弯矩达到最大值, 随着埋置深度的进一步增加, 桩身弯矩开始逐渐减小, 并在距地面 9.0 ~ 15.5 m 范围内产生负弯矩. 随着暴露时间延长, 相同深度处的桩身弯矩逐渐减小. 当暴露条件为 $C_a = C_b = 4.5 \text{ kg/m}^3$ 时, 暴露时间分别为 0、30、60 和 90 a 的管桩桩身最大弯矩分别为 431.1、427.6、412.7 和 408.2 $\text{kN} \cdot \text{m}$, 对比无锈蚀损伤桩, 暴露时间分别为 30、60 和 90 a 的管桩桩身最大弯矩分别减小了 0.8%、4.3% 和 5.3%. 当暴露条件为 $C_a = C_b = 9.0 \text{ kg/m}^3$ 时, 暴露时间分别为 0、30、60 和 90 a 的管桩桩身最大弯矩分别为 431.1、415.9、408.1 和 403.5 $\text{kN} \cdot \text{m}$, 对比无锈蚀损伤桩, 暴露时间分别为 30、60 和 90 a 的管桩桩身最大弯矩分别减小了 3.5%、5.3% 和 6.4%. 并且随着暴露时间的延长, 弯矩最大值点的位置略有上移.

6 结 论

- 1) 海洋环境条件下服役的钢筋混凝土管桩的水平承载性状具有明显的时变特性. 暴露条件越恶劣, 其时变特性越明显.
- 2) 随着暴露时间的延长, 桩身抗弯刚度呈非线性衰减, 桩身水平位移和桩身负剪力最大值逐渐增大, 桩身弯矩逐渐减小. 在相同荷载作用下, 对比桩身剪力和弯矩, 暴露时间对桩身水平位移的影响更加明显.

参考文献

[1] HSIUNG Y M, CHEN Y L. Simplified method for analyzing laterally loaded single piles in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 132(11):1018-1029.

[2] 王成, 邓安富. 水平荷载桩土共同作用全过程分析 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4):476-480.

[3] 赵明华, 邹新军, 罗松南, 等. 横向受荷桩侧土体位移应力分布弹性解 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6):767-771.

[4] HSIUNG Y M. Theoretical elastic-plastic solution for laterally loaded piles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(6):475-480.

[5] 常林越, 王金昌, 朱向荣, 等. 水平受荷长桩弹塑性计算解析解 [J]. 岩土力学, 2010, 31(10):3173-3178.

[6] 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):168-175.

[7] LIU Y, WEYERS R E. Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(3):365-379.

[8] LIU Y. Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures [D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.

[9] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design [M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.

[10] CECS 22—2007 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.

(编辑 赵丽莹)

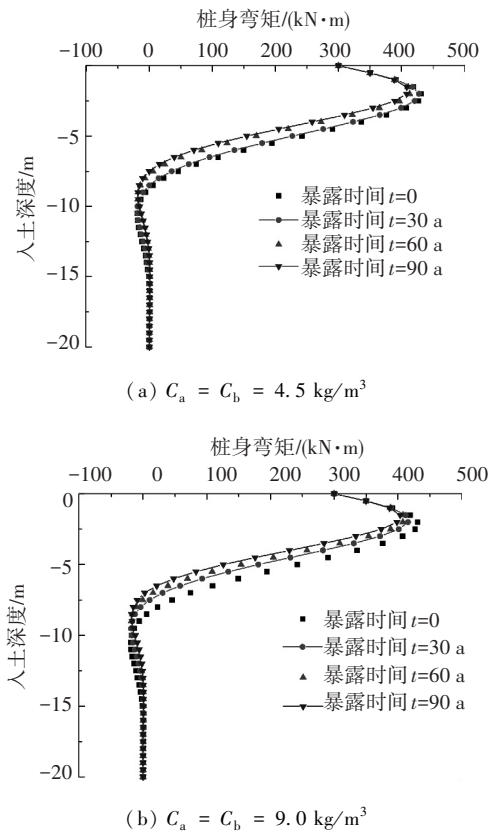


图 5 不同暴露条件下的桩身弯矩分布