



内河框架式码头梁构件抗弯承载能力 时变概率模型 *

吴林键^{1,2}, 张洪^{1,2}, 刘明维^{1,2}, 郭庆³, 杜波^{1,2}

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

3. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 港口码头梁构件的长期安全服役关乎整个码头结构的安全性, 内河环境下由于混凝土碳化引起的钢筋锈蚀是导致码头梁构件强度退化的主要原因。位于长江上游的内河框架式码头常年处于相对湿度变化的服役环境且长期承受弯曲应力作用, 将加剧码头梁构件的碳化进程, 严重威胁码头整体结构的耐久性。依托长江上游某典型港口框架式码头结构, 以综合考虑相对湿度变化和弯曲应力二者共同影响的混凝土碳化模型为基础, 结合钢筋混凝土材料锈蚀钢筋截面积、锈蚀钢筋强度、受弯构件承载力时变模型, 采用 Monte Carlo 随机模拟方法计算得到在设计使用年限 50 a 内码头梁构件抗弯承载能力时变概率分布。在此基础上经统计分析建立了内河框架式码头梁构件抗弯承载力时变概率模型, 为内河港口码头结构的耐久性评估提供理论依据。

关键词: 框架式码头; 抗弯承载能力; 时变概率模型; 钢筋锈蚀

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0034-08

Time-varying probability model of bending resistance capacity of beam within frame-type wharf in inland river

WU Lin-jian^{1,2}, ZHANG Hong^{1,2}, LIU Ming-wei^{1,2}, GUO Qing³, DU Bo^{1,2}

(1.National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2.Key Laboratory of the Ministry of Education on Hydraulic & Water Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3.CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd. Wuhan 430071, China)

Abstract: The long-term safe service of wharf beam is related to the safety of the whole wharf structure, and the corrosion of steel bars caused by carbonization of concrete in inland river environment is the main reason for the strength degradation of wharf beam members. The inland river frame wharf located in the upper reaches of the Yangtze River is always in the service environment with relative humidity changes and is subjected to bending stress for a long time, which will aggravate the carbonization process of the wharf beam members and seriously threaten the durability of the overall structure of the wharf. Relying on the frame wharf structure of a typical port frame wharf structure in the upper reaches of the Yangtze River, based on the concrete carbonation model that comprehensively considers the combined effects of the changes in relative humidity and bending stress, combined with the time-varying model of the sectional area of corroded reinforcement of reinforced concrete material, the strength of corroded

收稿日期: 2022-04-20

*基金项目: 重庆市教育委员会“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCX2020030); 水利水运工程教育部重点实验室开放基金资助项目(SLK2021B13); 四川省交通运输科技项目(2018-B-04)

作者简介: 吴林键(1990—), 男, 博士, 副教授, 从事港工结构设计及计算理论、钢筋混凝土耐久性方面的教学研究工作。

reinforcement, and the bearing capacity of flexural members, the time-varying probability distribution of the bending bearing capacity of the wharf beam members within the design service life of 50 years is calculated by Monte Carlo random simulation method. On this basis, the time-varying probability model of bending bearing capacity of beam members of inland river frame wharf is established through statistical analysis, which provides a theoretical basis for durability evaluation of inland river port wharf structures.

Keywords: frame wharf; bending resistance capacity; time-varying probability model; reinforcement corrosion

内河港口中, 钢筋混凝土结构耐久性问题日益突出。根据相关资料及现场调研^[1], 内河已建成营运的码头中, 部分已出现基础变形、钢筋混凝土构件开裂、钢筋锈蚀等问题(图1)。因此, 有必要开展内河港口码头钢筋混凝土结构的耐久性研究工作。梁构件作为港口码头结构重要组成之一, 其在设计使用年限内的耐久性对码头整体安全性意义重大。但随着时间的推移, 码头梁构件承载能力会因为钢筋锈蚀、混凝土保护层开裂而不断退化, 并且其退化过程充满不确定性, 按确定性方法不能反映混凝土结构性能退化的实际情况^[2], 开展码头结构梁构件抗力时变概率模型及方法的研究显得十分必要。

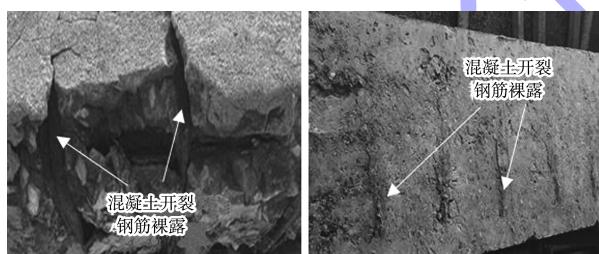


图1 混凝土开裂、钢筋锈蚀

当前, 众多学者针对不同环境下的不同结构构件建立了相应的抗力随时间变化的概率模型。王元战等^[3]将氯盐环境下影响结构长期承载能力最关键因素考虑为随机变量, 建立了构件抗力时变概率模型; 冯云芬等^[4]通过Monte Carlo模拟方法, 针对海洋环境下受腐蚀的钢筋混凝土受弯构件, 建立了考虑钢筋锈蚀影响的构件抗力衰减模型; 王磊等^[5]考虑不同因素对钢筋混凝土梁抗剪承载力的贡献, 通过数值模拟的方法, 建立了氯盐环境下RC梁抗剪承载力退化概率模型; 杨国平等^[6]考虑应力和氯离子共同作用对结构性能的综

合影响, 提出了针对这种情况的钢筋锈蚀模型, 并建立了港口钢筋混凝土结构承载力衰减模型。以上研究钢筋混凝土结构处于氯盐环境, 氯盐会诱导钢筋发生锈蚀, 从而导致钢筋混凝土结构失效过程加快。内河环境与海洋环境相比, 腐蚀性离子含量极低^[7], 氯离子并非是引起结构发生耐久性失效破坏的主要因素。事实上, 混凝土碳化所导致的内部钢筋锈蚀是引起内河港口码头结构发生耐久性失效破坏的主要原因^[8]。港区内码头梁构件所处环境相对湿度变化范围大, 会直接影响混凝土的碳化, 而且混凝土内液态水的含量也会受相对湿度变化的影响^[9], 从而影响混凝土内钢筋的锈蚀; 另外, 码头梁构件由于常年承受弯曲拉应力的原因, 造成构件开裂从而加快结构被侵蚀的速度^[10]。

本文依托长江上游某典型港口框架式码头结构, 以前期开展室内加速试验模拟得到的码头梁构件在相对湿度变化环境和长期承受弯曲应力荷载作用下混凝土碳化时变模型为基础, 结合钢筋混凝土材料锈蚀钢筋截面积时变模型、锈蚀钢筋强度时变模型、梁构件受弯承载力时变模型, 采用Monte Carlo随机模拟得到在设计使用年限50 a内码头梁构件抗弯承载力时变概率分布, 建立了内河框架式码头梁构件抗弯承载力时变概率模型, 可为内河港口码头结构的耐久性评估提供理论依据。

1 混凝土碳化时变模型

1.1 混凝土碳化深度模型

为揭示内河框架式码头梁构件在相对湿度变化环境和常年承受弯曲应力荷载耦合下的碳化规律, 郭庆^[11]基于室内加速试验, 通过控制混凝土

不同的受荷条件、改变混凝土养护箱中不同的相对湿度，测量不同碳化时间下的混凝土碳化深度，得到了内河环境相对湿度周期变化条件下受荷钢筋混凝土的碳化深度预测模型，选取该模型作为混凝土碳化深度预测模型，其表达式为：

$$x_c = k k_{rh} K_\sigma \sqrt{C_0 t} \quad (1)$$

$$K_\sigma = a\sigma + b \quad (2)$$

式中： x_c 为混凝土碳化深度 (mm)； k 为混凝土碳化系数，取值为 2.84； k_{rh} 为相对湿度变化影响系数(相对湿度变化条件下取 1.22，标准碳化条件时取 1.00)； σ 为应力水平(混凝土构件所受弯曲应力与最大抗弯强度的比值)； K_σ 为弯曲应力影响系数； a 、 b 均为常数(当混凝土受拉应力时， a 取 0.71、 b 取 1.00；当混凝土受压应力时， a 取 0.52、 b 取 1.00)； t 为混凝土碳化时间(d)。

1.2 混凝土抗压强度模型

对于梁构件时变抗弯承载力的计算，需要考虑两个方面的抗力变化：1) 需要考虑锈蚀后的钢筋截面积减小和材料强度降低；2) 随着混凝土抗压强度的衰减，需要考虑其对抗弯承载力产生的影响。郭庆通过室内加速试验得到了相对湿度变化下混凝土抗压强度时变模型：

$$f_{cu} = \begin{cases} (-0.0307t+1)f_{cu,0} & (t < 7 \text{ d}) \\ (0.0144t+0.6841)f_{cu,0} & (t \geq 7 \text{ d}) \end{cases} \quad (3)$$

式中： f_{cu} 为某一时间混凝土的抗压强度 (MPa)； $f_{cu,0}$ 为混凝土初始抗压强度，取 43.65 MPa； t 为碳化时间(d)。

根据强度预测模型计算不同年份混凝土的抗压强度，通过 Monte Carlo 方法在每个年份模拟生成 1 万组随机样本，从而得到不同年份混凝土抗压强度的概率分布。

2 钢筋锈蚀模型

2.1 钢筋混凝土结构累计损伤过程

对于内河码头钢筋混凝土结构，在服役期内有两个重要时间节点，即钢筋初锈时间 t_i 和混凝土保护层开裂时间 t_{i+c} ，如图 2 所示，其全生命周期 ($0 \sim t_s$) 被这两个时间节点分为 3 个阶段：碳化深

度发展期、锈蚀膨胀期、裂缝发展期。

钢筋初锈时间 t_i 和混凝土保护层开裂时间 t_{i+c} 作为两个关键临界时间节点，可明确不同阶段钢筋的锈蚀速率，对确定钢筋截面积与锈蚀率十分重要。

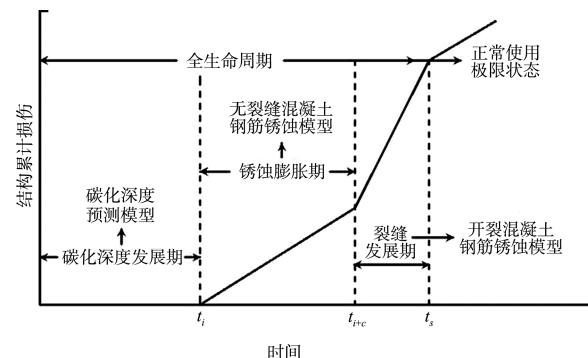


图 2 碳化环境钢筋混凝土结构全生命周期累计损伤过程

2.2 钢筋锈蚀时间

2.2.1 钢筋锈蚀开始时间

在工程实际情况中，并非是碳化达到保护层厚度或是碳化达到钢筋表面后钢筋就发生锈蚀，钢筋开始锈蚀实际上是与钢筋混凝土结构自身条件和所处的环境有关^[12]，本文拟选用徐善华等^[13]提出的碳化残量计算公式：

$$x_0 = 4.86(-RH^2 + 1.5RH - 0.45)(c-5)(\ln f_{cu,k} - 2.3) \quad (4)$$

式中： x_0 为混凝土碳化残量 (mm)； RH 为环境相对湿度 (%)； c 为保护层厚度 (mm)； $f_{cu,k}$ 为混凝土抗压强度标准值 (MPa)。

由式(1)和(4)可以求得钢筋初始锈蚀时间为：

$$t_i = \left(\frac{c-x_0}{kk_{rh}K_\sigma\sqrt{C_0}} \right)^2 \quad (5)$$

2.2.2 混凝土保护层开裂时间

2.2.2.1 临界锈蚀量

根据《混凝土结构耐久性评定标准》^[14]，将混凝土保护层开裂时的钢筋锈蚀量定义为临界锈蚀量，可以用锈蚀深度来表征。选用标准中的临界锈蚀深度计算公式计算临界钢筋锈蚀深度：

$$\delta_{cr} = 0.012 \cdot \frac{c}{d} + 0.00084 f_{cu,k} + 0.018 \quad (6)$$

式中： δ_{cr} 为临界锈蚀深度 (mm)； c 为混凝土保护

层厚度(mm)； d 为钢筋直径(mm)； $f_{cu,k}$ 为混凝土抗压强度标准值。

2.2.2.2 钢筋锈蚀速率

孙艺^[15]认为保护层开裂会影响锈蚀速度, 即

$$\lambda(t) = 0.0116 i_{corr}(t) = \begin{cases} 0.0116 \cdot \frac{37.8(1-W/C)^{-1.64}}{c} \cdot 0.85t^{-0.29} & (0 < t < t_{i+c}) \\ 0.0116 \cdot \{0.3683 \ln[t - (t_c - t_1)] + 1.1305\} & (t > t_{i+c}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\lambda(t)$ 为钢筋锈蚀速率(mm/a)； $i_{corr}(t)$ 为 t 时刻的锈蚀电流($\mu A/cm^2$)； W/C 为混凝土的水灰比； c 为混凝土保护层厚度(mm)； t_c 为钢筋开始锈蚀到混凝土保护层锈胀开裂的时间； t 为满足锈蚀速度在时间上的连续性的相对时间点。

其中, t_1 可通过 $i_{Kim}(t_c) = i_{Li}(t_1)$ 求解, 即:

$$\frac{37.8(1-W/C)^{-1.64}}{c} \cdot 0.85t_c^{-0.29} = 0.3686 \ln t_1 + 1.1305 \quad (8)$$

2.2.2.3 混凝土保护层开裂时间

根据式(6)(8), 令 $\delta_{cr} = \int_0^{t_c} \lambda(t) dt$, 可计算得出钢筋开始锈蚀到混凝土保护层开裂的时间 t_c :

$$\delta_{cr} = \int_0^{t_c} \lambda(t) dt = \int_0^{t_c} \left[0.0116 \times \frac{37.8(1-W/C)^{-1.64}}{c} \times 0.85t^{-0.29} \right] dt = \frac{0.525(1-W/C)^{-1.64}}{c} \cdot t_c^{0.71} \quad (9)$$

$$t_c = \left[\frac{0.02286c/d + 0.0016f_{cu,k} + 0.03429}{(1-W/C)^{-1.64}/c} \right]^{1.4} \quad (10)$$

2.3 锈蚀钢筋截面积、强度计算模型

2.3.1 锈蚀钢筋截面积计算模型

事实上, 通过式(5)和式(10)可计算得到的钢筋初始锈蚀时间 t_i 和混凝土保护层开裂时间 t_{i+c} , 将式(5)和式(10)计算的结果代入Kim-Li模型可以得到设计使用年限内的任意时间样本中的钢筋直径:

$$d(t) = \begin{cases} d_0 & (t \leq t_i) \\ d_0 - 2 \int_0^{t-t_i} \lambda(t) dt & (t_i < t \leq t_{i+c}) \\ d_0 - 2\delta_{cr} - 2 \int_{t_i+c}^{t-t_i-t_c} \lambda(t) dt & (t > t_{i+c}) \end{cases} \quad (11)$$

开裂前后钢筋的锈蚀模型应分别考虑, 并提出Kim-Li模型作为钢筋锈蚀速率的时变模型。根据此模型计算得到钢筋锈蚀速率:

式中: $d(t)$ 为 t 时刻的锈蚀钢筋直径; d_0 为钢筋初始直径; 其中混凝土保护层开裂的时间 $t_{i+c} = t_i + t_c$ 。

根据式(11)可计算 t 时刻样本中的钢筋直径, 从而得到 t 时刻样本中的钢筋截面积 $A(t)$ 及钢筋锈蚀率 ρ_s :

$$A(t) = \pi d^2(t)/4 \quad (12)$$

$$\rho_s = 1 - d^2(t)/d_0^2 \quad (13)$$

式中: $A(t)$ 为 t 时刻的钢筋截面积; ρ_s 为 t 时刻的锈蚀钢筋截面积损失率。

2.3.2 锈蚀钢筋强度计算模型

钢筋发生锈蚀后, 钢筋的截面积减小、钢筋屈服强度也会降低。锈蚀钢筋的实际屈服强度 f_y 可表示为:

$$f_y = k_y f_{y,0} \quad (14)$$

式中: k_y 为钢筋强度降低系数; $f_{y,0}$ 为钢筋初始屈服强度(MPa)。

由沈德建等^[16]总结的Ⅱ级钢筋强度衰减模型可知, 钢筋强度降低系数与钢筋锈蚀率有关, 降低系数 k_y 根据下式计算:

$$k_y = \frac{1 - 1.33\rho_s}{1 - \rho_s} \quad (15)$$

3 码头梁构件受弯承载力及随机模拟方法

3.1 码头梁构件受弯承载力计算方法

参考JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[17], 矩形梁构件正截面受弯承载力公式为:

$$\begin{cases} M_u = \alpha_1 f_c b x (h_0 - x/2) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \\ \alpha_1 f_c b x = f_y A_s - f'_y A'_s \end{cases} \quad (16)$$

式中: M_u 为混凝土构件正截面的极限弯矩值($N\cdot mm$); f_c 为混凝土抗压强度(N/mm^2); b 为截

面宽度 (mm); h_0 为截面的有效高度 (mm); x 为混凝土受压区计算高度 (mm); f_y' 为受压钢筋强度设计值 (N/mm^2); A_s' 为受压钢筋截面积 (mm^2); a_s' 为受压钢筋合力点至受压区边缘距离 (mm); f_y 为受拉钢筋强度设计值; A_s 为受拉钢筋截面积; α_1 为系数, 混凝土强度等级不超过 C50 时, 可取 1.0。

3.2 码头梁构件受弯承载力随机模拟方法

根据前文得到的不同时刻钢筋截面积、锈蚀后钢筋强度、混凝土抗压强度的随机样本, 可以通过式(16)计算得到不同时刻下钢筋混凝土梁构件抗弯承载力的随机样本, 并可进行统计分析得到其承载力的概率分布。

根据以上思路, 梁构件在设计使用年限内抗弯承载力退化的 Monte Carlo 模拟方法过程见图 3。

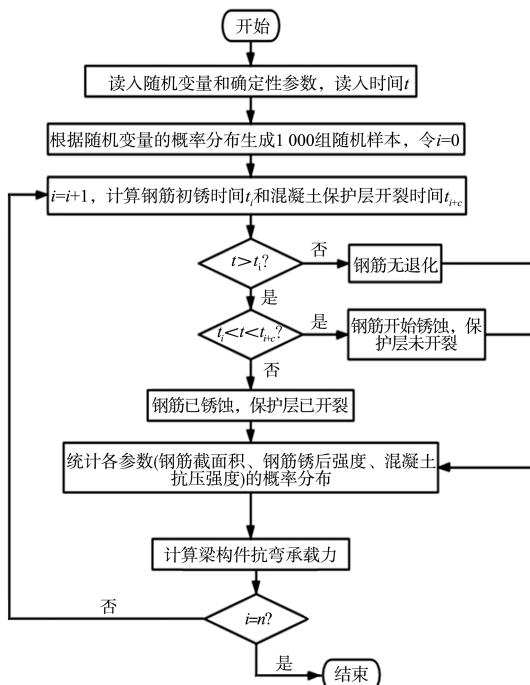


图 3 梁构件抗弯承载力时变概率模型计算流程

4 案例分析

4.1 工程概况

长江上游某框架式码头的纵、横梁构件主要尺寸如下: 横梁截面尺寸为 $2200 \text{ mm} \times 2500 \text{ mm}$, 保护层净厚度 40 mm, 受拉区配筋 $10\phi 28 \text{ mm}$, 受压区配筋 $14\phi 32 \text{ mm}$; 纵梁截面尺寸为 $1000 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$, 保护层厚度 40 mm, 受拉区配筋 $7\phi 28 \text{ mm}$, 受压区配筋 $5\phi 28 \text{ mm}$ 。梁构件混凝土强度等级为 C30, 水灰比为 0.46, 主筋型号为 HRB335 钢筋 (Ⅱ级钢筋)。

4.2 随机变量统计参数和概率分布

为建立码头梁结构抗弯承载力时变概率模型, 将钢筋混凝土材料及构件尺寸等影响结构状态的因素视为随机变量。陈清眉^[18]通过查阅文献资料, 得到各随机变量的统计参数及概率分布, 见表 1。

表 1 随机变量统计参数及概率分布类型

参数	均值系数	变异系数	概率分布
保护层厚度 c	0.850	0.300	正态
钢筋直径	1.000	0.018	正态
混凝土水灰比	1.000	0.200	正态
钢筋屈服强度	1.085	0.072	正态
梁截面高	1.000	0.015	正态
梁截面宽	1.000	0.010	正态

4.3 码头梁构件使用寿命

考虑到码头梁构件真实服役环境, 综合考虑相对湿度周期变化影响系数 k_{rh} 、弯曲应力影响系数 K_σ 的影响, 结合混凝土保护层厚度的概率分布、混凝土水灰比、保护层厚度、钢筋直径和混凝土抗压强度的概率分布, 根据式(5)和式(10)运用 Monte Carlo 方法进行随机模拟得到统计参数, 见表 2。

表 2 梁构件重要时间点及使用寿命

构件类型	荷载水平	初锈时间/a		初锈到保护层开裂时间/a		保护层开裂时间/a
		均值	标准差	均值	标准差	
纵梁	0.3	17.08	7.41	4.77	2.01	21.85
	0.6	13.83	6.16			18.60
横梁	0.3	17.06	7.54	4.53	1.88	21.59
	0.6	13.91	6.14			18.44

注: 荷载水平为抗折强度乘以系数。

从表2可以看出, 在0.3弯曲拉应力水平下, 纵、横梁的初锈时间约为17 a; 在0.6弯曲拉应力水平下, 二者的初锈时间缩短为14 a, 其使用寿命也会相应缩短。与钢筋初锈时间相比, 钢筋初锈到混凝土保护层开裂时间远小于前者, 说明在锈蚀发生后发展迅速, 短期内就能使保护层开裂, 导致结构承载力衰退。

4.4 锈蚀钢筋截面积时变概率模型

采用锈蚀钢筋截面积计算模型式(12), 对纵、横梁构件锈蚀过程进行1万组Monte Carlo随机模拟, 对0~50 a内每隔5 a的横梁钢筋截面积数据进行统计分析, 作频数直方图并正态分布拟合, 拟合结果见图4。

由图4可见, 对于设计使用年限内的不同时刻, 横梁中钢筋截面积的频数分布直方图与正态分布密度曲线拟合相关性较好, 可认为锈蚀钢筋截面积服从正态分布。

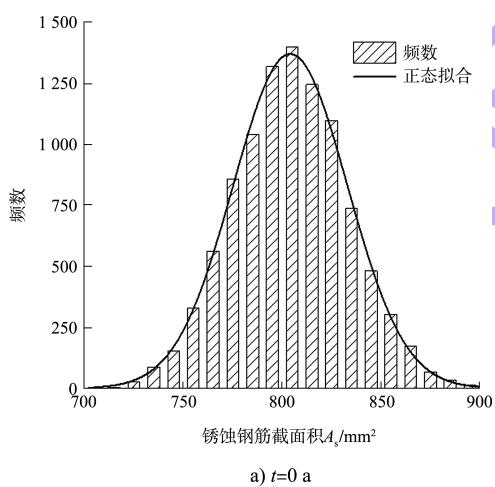
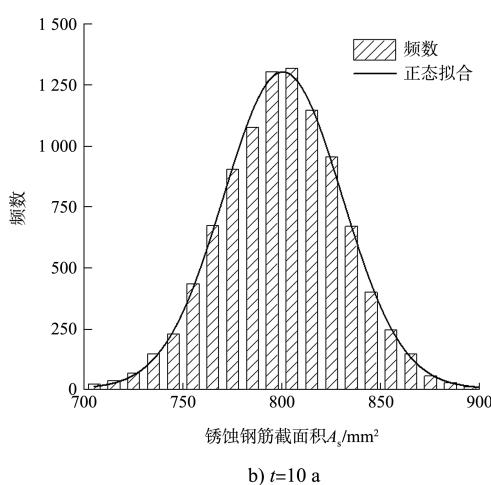
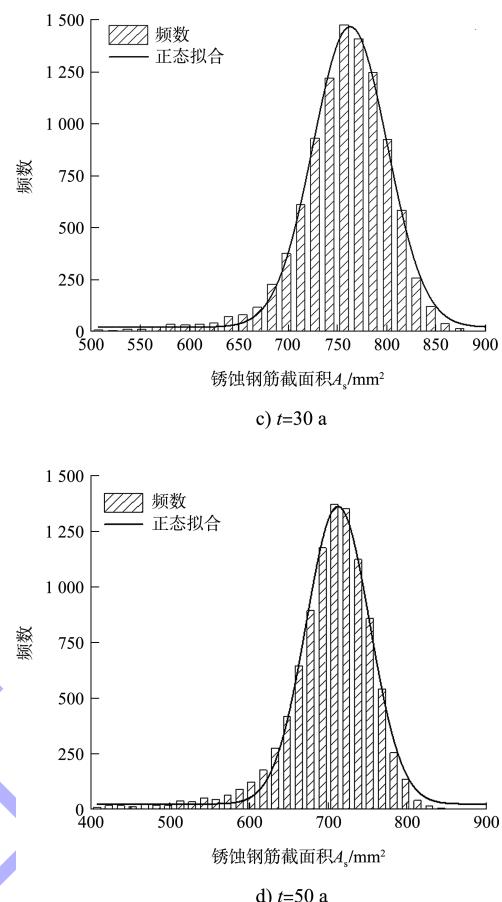
a) $t=0$ ab) $t=10$ a

图4 不同时刻横梁锈蚀钢筋截面积分布

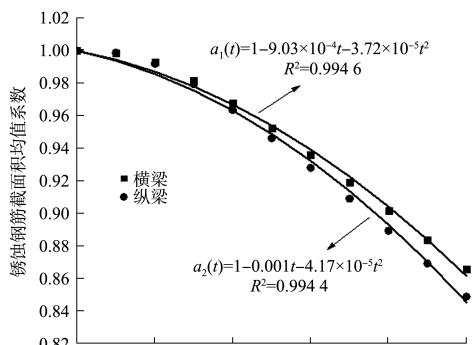
统计0~50 a内每隔5 a的钢筋截面积分布的均值和标准差, 并通过归一化处理, 分别计算其均值系数和标准差系数, 并对均值系数及标准差系数采用不同的时程函数进行拟合:

$$\begin{cases} \mu_A(t) = \alpha(t)\mu_{A_0} \\ \sigma_A(t) = \beta(t)\sigma_{A_0} \end{cases} \quad (17)$$

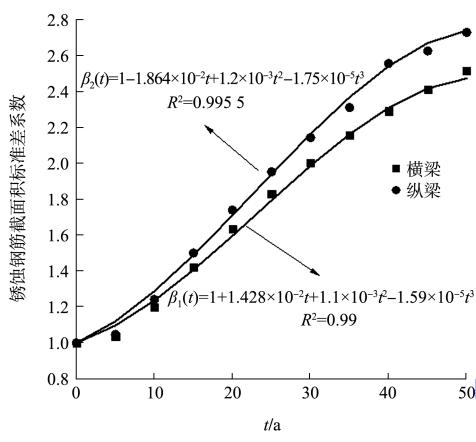
式中: $\mu_A(t)$ 、 $\sigma_A(t)$ 分别为 t 时刻钢筋截面积的均值和标准差; μ_{A_0} 为钢筋初始截面积的均值; σ_{A_0} 为初始时刻钢筋截面积的标准差; $\alpha(t)$ 为钢筋截面积均值的时变函数; $\beta(t)$ 为钢筋截面积标准差的时变函数。

锈蚀钢筋截面积的均值系数、标准差系数拟合曲线见图5。

从图5可以看出, 当梁构件服役50 a后, 纵梁和横梁中锈蚀钢筋截面积的均值系数已降低到初始值的84%左右, 标准差系数增长了约150%。



a) 均值系数



b) 标准差系数

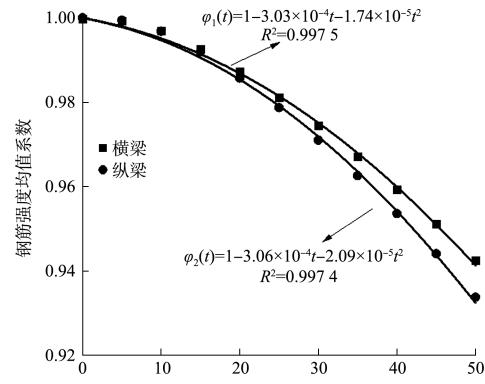
图 5 钢筋截面积均值系数与标准差系数时变曲线

随着服役时间的增长，横梁和纵梁的均值系数不断减小且曲线的斜率逐渐变大，这是因为锈蚀产物随着钢筋锈蚀过程的进行而不断累积，使得混凝土裂缝延展，钢筋与空气的接触面积增大，加快了钢筋锈蚀的速率。标准差系数逐渐增大并趋于稳定，这是因为锈蚀达到极限值时，钢筋截面积在小范围内波动，标准差也逐渐稳定。

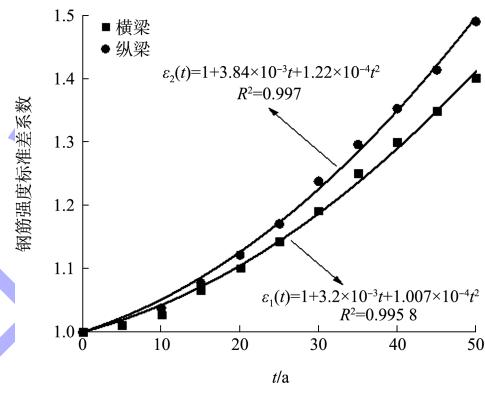
4.5 锈蚀钢筋强度时变概率模型

根据式(12)(13)可以计算得到锈蚀钢筋截面积损失率 ρ_s ，代入表示锈蚀钢筋强度与锈蚀率关系的式(13)(14)中，计算所有样本的锈蚀钢筋强度，通过 Monte Carlo 随机模拟，同样可得到不同时间点下钢筋强度的频数分布，统计得不同时刻钢筋锈后强度概率分布的均值和标准差，经换算可得到其均值系数和标准差系数。钢筋锈蚀后强

度的均值系数和标准差系数拟合曲线见图 6。



a) 均值系数



b) 标准差系数

图 6 钢筋强度均值系数与标准差系数时变曲线

结果表明，钢筋锈蚀后强度与钢筋截面积的变化规律相似，而标准差随时间不断增加。经过 50 a 后，钢筋强度衰减幅度不大，纵横梁钢筋强度约为初始值的 93%。相比于钢筋截面积变化，钢筋强度标准差的增幅更小，50 a 后其标准差约为初始值的 1.4~1.5 倍。

4.6 梁构件抗弯承载力时变概率模型

基于对钢筋锈蚀过程的随机模拟以及混凝土抗压强度模型得到混凝土强度时变概率分布，根据式(16)梁构件抗弯承载力计算方法，通过 Monte Carlo 方法进行 1 万组随机模拟，得到构件在不同时刻抗弯承载力的频数分布，统计得到不同时刻下纵、横梁抗弯承载力概率分布的均值及标准差，换算可得到其均值系数和标准差系数，构件抗弯承载力的均值和标准差拟合曲线见图 7。

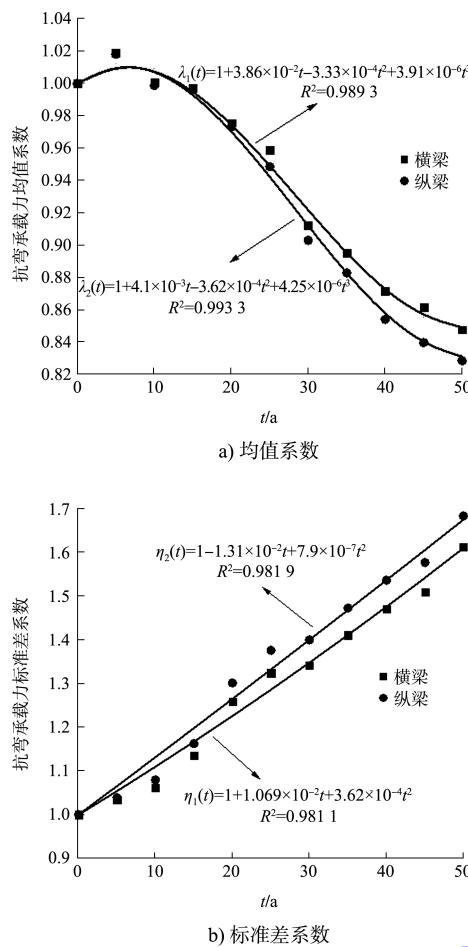


图 7 构件抗弯承载力均值系数与标准差系数时变曲线

从图 7 可见, 纵、横梁抗弯承载力的均值在服役初期(0~15 a)略有增加, 这是由于在服役初期, 钢筋未发生锈蚀, 构件的抗弯承载能力主要受混凝土强度影响, 随着碳化作用的进行, 混凝土强度有所提高, 继而构件的抗弯承载能力有所提高。当超过初锈时间后, 钢筋是影响构件抗弯承载能力的主要因素, 随着钢筋锈蚀不断发展, 钢筋截面积减小、强度衰退, 导致混凝土保护层开裂, 构件抗弯承载力均值将明显降低。此外, 纵横梁的抗弯承载力标准差均呈现随时间稳定增长的趋势, 说明越到服役末期, 构件抗力的波动区间越大、越可能出现极值, 同时抗弯承载力以较快的速率退化, 故在服役末期构件极大概率处于不稳定的状态。由此可见, 梁构件是可能导致内河码头结构耐久性被破坏的危险构件, 应在使用年限内对其安全性进行重点监测。

5 结论

1) 在设计使用年限内, 无论是纵梁还是横梁, 其锈蚀钢筋截面积、锈蚀钢筋强度均服从正态分布, 其均值随着时间不断减小, 标准差则逐渐增大。在梁构件服役期间模拟的第 50 a, 钢筋截面积均值系数衰减为初始值的 84%, 钢筋截面积标准差系数增大到初始值的 2.5~2.7 倍。

2) 在服役期的 0~15 a 内, 随着碳化反应的进行, 混凝土强度有所提高; 并且由于该阶段混凝土强度是影响梁构件抗弯承载力的主要因素, 故在此阶段纵、横梁抗弯承载力的均值略有增加。

3) 超过钢筋初锈时间, 钢筋开始锈蚀, 并导致混凝土保护层开裂后梁构件抗弯承载力显著下降, 此时钢筋截面积与钢筋强度的时变影响对梁构件抗弯承载力起主导作用。在服役期末(即第 50 a), 纵梁和横梁的抗弯承载力分别降低到初始值的 83%、85%。由于钢筋锈蚀率直接影响其钢筋强度与截面积, 故钢筋锈蚀退化模型对构件抗力时变规律起着决定性作用。

参考文献:

- [1] 李燕兵. 内河在役直立式码头构件承载力的弱化规律的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [2] 李荣庆, 贡金鑫, 杨林虎. 港口工程钢筋混凝土结构性能退化规律概率分析[J]. 水运工程, 2014(1): 64-69.
- [3] 王元战, 陈清眉. 氯盐环境下钢筋混凝土构件抗力的时变概率模型[J]. 水道港口, 2018, 39(5): 584-595.
- [4] 冯云芬, 贡金鑫, 杨国平, 等. 钢筋锈蚀率的概率模型及时变可靠度分析[J]. 水利水运工程学报, 2014(1): 24-32.
- [5] 王磊, 丁蔚, 马亚飞, 等. 锈蚀 RC 梁斜截面受剪抗力退化概率模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2011, 8(4): 34-41.
- [6] 杨国平, 贡金鑫, 吴锋, 等. 港口工程钢筋混凝土结构性能退化模型研究[J]. 水运工程, 2015(2): 60-65.
- [7] 王高林. 内河港口码头桩基础全生命周期承载性能演化规律[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.