



# 基于 Monte-Carlo 法的锈蚀钢筋混凝土构件 截面钢筋锈蚀率研究\*

李嘉民, 应宗权, 梁梓豪, 刘梅梅, 赵娟

(中交四航工程研究院有限公司, 水工构造物耐久性技术交通运输行业重点实验室,  
中交集团建筑材料重点实验室, 广东 广州 510230)

**摘要:** 从原型构件和加速腐蚀构件中获取不同锈蚀程度的钢筋试件, 借助三维激光扫描技术计算得到各锈蚀钢筋试件的残余截面面积数据, 并对其进行统计分析; 通过 Monte-Carlo 抽样算法, 研究构件截面钢筋锈蚀率与构件整体钢筋锈蚀率、配筋数量的关系, 并对比分析这两种构件锈蚀率指标在锈蚀钢筋混凝土梁承载力评估中的性能特点。结果表明, 广义极值分布模型对锈蚀钢筋残余截面面积概率分布拟合效果最佳; 构件截面钢筋锈蚀率与构件整体钢筋锈蚀率之比  $\alpha$  随构件整体钢筋锈蚀率的增大和配筋数量的增加而减小; 构件截面钢筋锈蚀率能更准确地预测锈蚀钢筋混凝土梁剩余承载力。

**关键词:** 锈蚀钢筋混凝土; 统计分析; 广义极值; 承载力评估

中图分类号: U654

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0029-08

## Comprehensive corrosion rate at cross-section of corroded reinforced concrete member by Monte-Carlo method

LI Jiamin, YING Zongquan, LIANG Zihao, LIU Meimei, ZHAO Juan

(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Durability Technology,  
Ministry of Transport, Key Laboratory of Construction Material, CCCC, Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** We obtain varying degrees of corroded reinforcement specimens from prototype and accelerated corrosion members. Using 3D laser scanning, we calculate and statistically analyze the residual cross-sectional areas of each corroded reinforcement specimen. We study the relationship among the comprehensive corrosion rate at the cross-section of corroded reinforced concrete and the overall corrosion rate of corroded reinforced concrete, as well as the number of reinforcements using Monte-Carlo sampling algorithm, and carry out a comparative analysis of the performance characteristics of these two corrosion rate indicators in the assessment of the bearing capacity of corroded reinforced concrete beams. The results show that the generalized extreme value distribution model provide the best fit for the probability distribution of residual cross-sectional areas of corroded reinforcement. The ratio  $\alpha$  of the comprehensive corrosion rate at the cross-section and the overall corrosion rate of corroded reinforced concrete decreases as the overall corrosion rate of corroded reinforced concrete and the number of reinforcements increase. On the basis of the comprehensive corrosion rate at the cross-section, the residual bearing capacity of corroded reinforced concrete beam can be predicted more accurately.

**Keywords:** corroded reinforced concrete; statistical analysis; generalized extreme value; bearing capacity evaluation

收稿日期: 2024-04-03

\*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB2603000)

作者简介: 李嘉民 (1995—), 男, 硕士, 研究方向为钢筋混凝土结构耐久性、结构监测、数字信号及图像处理。

氯离子对钢筋的腐蚀是影响海洋环境下在役港口码头结构安全的关键问题,这种腐蚀会导致钢筋沿杆长方向不同程度地减小截面积,从而降低其承载能力。因此,准确测量和评估锈蚀钢筋的形态特征对结构安全评估至关重要。

目前,计算机断层(CT)扫描、三维激光扫描等技术为结构损伤的表征和重构提供更为精准的手段,已广泛应用在航空、机械、建筑工程等领域。许多学者基于三维激光扫描技术研究锈蚀钢筋的形态特征。然而由于腐蚀效应的不确定性和腐蚀环境的差异,各研究提出不同的概率分布,如正态分布<sup>[1]</sup>、对数正态分布<sup>[2-3]</sup>、Gumbel 分布<sup>[4-5]</sup>等,这导致后续工程实践中应用锈蚀数据时存在混乱。

另一方面,工程实践中锈蚀钢筋混凝土梁承载力评估主要参考相关规范给出的计算公式。这些公式原理相似,方法简单、易行,采用腐蚀钢筋强度利用系数、腐蚀后钢筋强度设计值与平均残余截面积相乘得到其腐蚀钢筋的抗力。然而,现场检测评估得到的往往是通过抽样检测得到在役构件内多根受力钢筋的综合平均锈蚀率,在构件承载力计算截面处采用整体平均锈蚀率计算得到的锈蚀钢筋截面积忽略了各钢筋间锈蚀的相关性和钢筋自身锈蚀的不均匀性,无法准确地评估出在役构件的剩余承载能力。

本文通过原型构件和加速腐蚀构件得到不同锈蚀程度的钢筋试件,利用三维激光扫描技术获取其残余截面积分布,并建立不同锈蚀程度下的概率分布模型;结合 Monte-Carlo 抽样算法,探究锈蚀钢筋混凝土结构承载力评估的构件截面钢筋锈蚀率与构件整体钢筋锈蚀率、配筋数量的关系,并通过原型构件承载力分析验证构件截面钢筋锈蚀率在预测剩余承载力方面的优势,旨在为海洋环境下在役钢筋混凝土结构的耐久性评估提供参考。

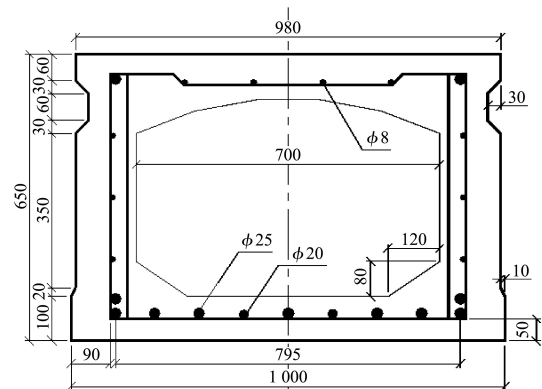
## 1 试验概况

### 1.1 试件来源

原型构件取自华东地区某滨海码头引桥的 6 根锈蚀钢筋混凝土空心梁。该码头建于 1985 年,受海水腐蚀以及各种荷载影响较为严重,见图 1a)。原型构件的外尺寸为长 12 m、宽 1 m、高 0.65 m,内空尺寸为宽 0.7 m、高 40 mm,混凝土设计强度等级为 C30,保护层厚度 50 mm,采用 HRB335 钢筋,底部为 9 根直径 25 mm 钢筋和 2 根直径 20 mm 钢筋,顶部为 4 根直径 8 mm 钢筋和 2 根直径 25 mm 钢筋,见图 1b)。在原型构件不同部位处随机截取 10 根长 500 mm 的锈蚀钢筋试件作为原型构件钢筋试件。



a) 现场检测



b) 空心梁板截面配筋(单位: mm)

图 1 华东滨海码头锈蚀钢筋混凝土梁构件  
Fig. 1 Corroded reinforced concrete beam member  
at coastal wharf in East China

加速腐蚀构件采用人工电化学加速腐蚀的方法获取。试件梁尺寸为 1 400 mm×150 mm×250 mm (长×宽×高), 混凝土设计强度等级为 C30, 保护层厚度均为 30 mm, 采用 HRB335 钢筋, 底部为

2 根直径 12 mm 受拉钢筋, 顶部为 2 根直径 8 mm 受压钢筋, 见图 2。完成加速腐蚀试验后将混凝土破型, 取出 10 根不同锈蚀程度的加速腐蚀构件钢筋试件。

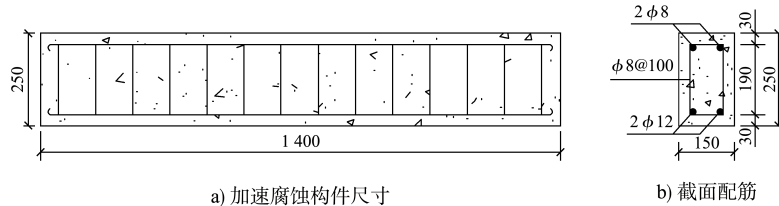


图 2 加速腐蚀构件尺寸及截面配筋 (单位: mm)

Fig. 2 Dimensions and section reinforcement layout of accelerated corrosion member (unit: mm)

## 1.2 锈蚀率量测

通过酸洗去除原型构件和加速腐蚀构件钢筋试件表面腐蚀产物后, 用石灰水中和浸泡, 并冲洗烘干, 得到除锈后的钢筋试件。然后利用扫描精度为 0.02 mm 的三维激光扫描仪对锈蚀钢筋试件进行扫描并建立三维模型, 见图 3。沿杆长方向每 1 mm 间隔截取出锈蚀钢筋的横截面轮廓, 并计算其残余截面积。根据锈蚀钢筋残余截面积数据可以得出锈蚀钢筋的平均截面锈蚀率  $\eta_{av}$  和最大截面锈蚀率  $\eta_{max}$ , 公式为:

$$\eta_{av} = (A_0 - A_{r,av}) / A_0 \quad (1)$$

$$\eta_{max} = (A_0 - A_{r,min}) / A_0 \quad (2)$$

式中:  $A_0$  为未锈蚀钢筋的公称截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $A_{r,av}$  为锈蚀钢筋的平均残余截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $A_{r,min}$  为锈蚀钢筋最小残余截面积,  $\text{mm}^2$ 。原型构件和加速腐蚀构件钢筋试件按其平均截面锈蚀率从小到大分别编号为 N-1 ~ N-10、A-1 ~ A-10, 各锈蚀钢筋试件的锈蚀情况见表 1, 其中  $\eta_{max} / \eta_{av}$  在 1.51 ~ 2.94。

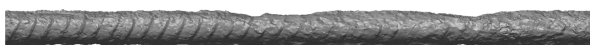


图 3 锈蚀钢筋三维模型

Fig. 3 3D model of corroded reinforcement

表 1 原型构件和加速腐蚀构件钢筋试件的锈蚀情况

Tab. 1 Corrosion conditions of reinforcement samples for prototype and accelerated corrosion members

类型	编号	$\eta_{av} / \%$	$\eta_{max} / \%$
原型 构件	N-1	11.70	25.65
	N-2	12.04	31.79
	N-3	13.04	27.03
	N-4	13.64	28.77
	N-5	13.66	39.21
	N-6	15.04	26.74
	N-7	19.31	32.09
	N-8	19.31	43.44
	N-9	21.33	32.49
	N-10	25.76	40.10
加速 腐蚀 构件	A-1	4.00	9.02
	A-2	4.21	7.67
	A-3	9.13	15.10
	A-4	9.81	28.87
	A-5	17.23	37.18
	A-6	22.96	40.40
	A-7	25.86	39.01
	A-8	30.52	50.42
	A-9	41.38	64.96
	A-10	41.94	72.95

## 2 锈蚀钢筋残余截面积分布

### 2.1 概率分布特征

锈蚀钢筋残余截面积分布在预测其力学性能方面扮演着至关重要的角色<sup>[6]</sup>。为方便对比分析,

定义截面相对值为：

$$A_{rel} = A_{r,i} / A_0 \times 100\% \quad (3)$$

式中： $A_{r,i}$  为锈蚀钢筋试件某一截面处残余截面积， $\text{mm}^2$ 。对原型构件和加速腐蚀钢筋试件的残余截面面积相对值进行统计分析，选定多个常用概率分布模型进行拟合，包括正态分布、对数正态分布、Gumbel 分布、Fréchet 分布和 Weibull 分布。部分典型的锈蚀钢筋残余截面面积相对值统计直方图及其最优分布见图 4。可以看出，锈蚀钢筋试件并不服从单一的概率分布模型，在不同锈蚀程度下呈现出不同的概率分布模型，这与文献[7]的结论相近。因此需要一个更为灵活的概率分布模型来准确描述不同锈蚀程度下锈蚀钢筋残余截面面积分布特征。

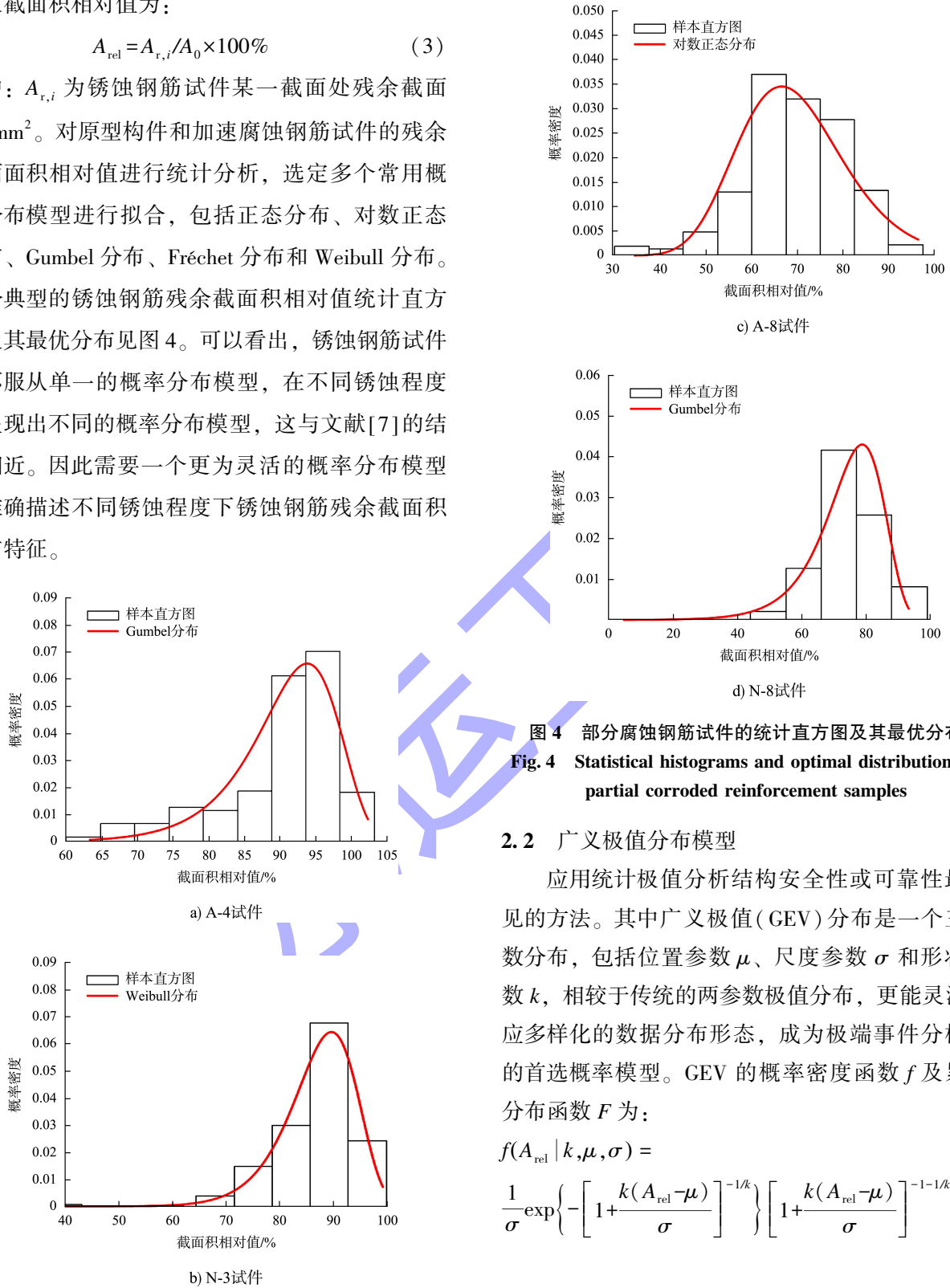


图 4 部分锈蚀钢筋试件的统计直方图及其最优分布  
Fig. 4 Statistical histograms and optimal distributions of partial corroded reinforcement samples

### 2.2 广义极值分布模型

应用统计极值分析结构安全性或可靠性最常见的方法。其中广义极值(GEV)分布是一个三参数分布，包括位置参数  $\mu$ 、尺度参数  $\sigma$  和形状参数  $k$ ，相较于传统的两参数极值分布，更能灵活适应多样化的数据分布形态，成为极端事件分析中的首选概率模型。GEV 的概率密度函数  $f$  及累积分布函数  $F$  为：

$$f(A_{rel} | k, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \exp \left\{ - \left[ 1 + \frac{k(A_{rel} - \mu)}{\sigma} \right]^{-1/k} \right\} \left[ 1 + \frac{k(A_{rel} - \mu)}{\sigma} \right]^{-1-1/k} \quad (4)$$

$$F(A_{rel} | k, \mu, \sigma) = \exp \left\{ - \left[ 1 + k \left( \frac{A_{rel} - \mu}{\sigma} \right)^{-1/k} \right] \right\} \quad (5)$$

GEV 分布在形状系数  $k > 0$  和  $k < 0$  分别对应三参数的 Fréchet 分布和 Weibull 分布; 而当  $k = 0$  时, GEV 分布对应 Gumbel 分布。本文采用 GEV 模型对锈蚀钢筋残余截面积相对值进行进一步拟合, 并使用可决系数  $R^2$  作为度量拟合优度的评价指标。锈蚀钢筋残余截面积概率分布模型拟合  $R^2$  的箱形图见图 5。可以看出, GEV 分布拟合  $R^2$  大多数位于 0.7~1.0, 说明其综合拟合优度更高, 能很好地表征不同锈蚀率下钢筋残余截面积分布特征。

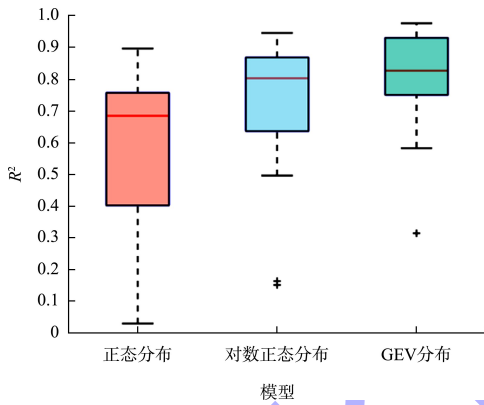


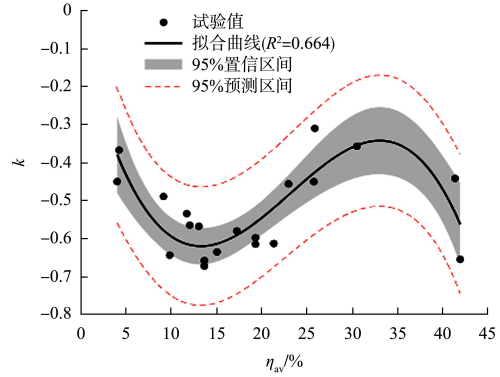
图 5 不同概率分布模型拟合可决系数  $R^2$  对比  
Fig. 5 Comparison of coefficients  $R^2$  from fits of different probability distribution models

为探究 GEV 分布模型参数与锈蚀钢筋平均截面锈蚀率  $\eta_{av}$  之间的对应关系, 以  $\eta_{av}$  为自变量, 对 GEV 分布模型的  $k$ 、 $\mu$  和  $\sigma$  进行回归分析。原型构件和加速腐蚀构件钢筋试件的回归分析结果见图 6 和式(6)~(7)。

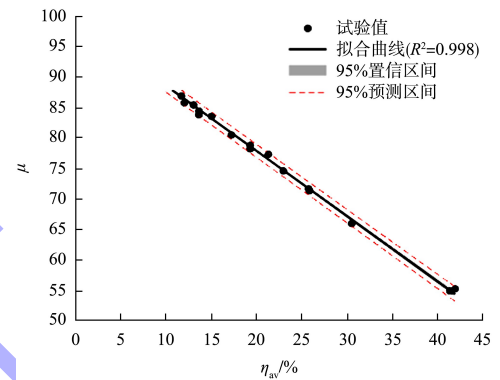
$$k = -71.76\eta_{av}^3 + 49.85\eta_{av}^2 - 9.443\eta_{av} - 0.0763 \quad (6)$$

$$\mu = -106.9\eta_{av} + 99.24 \quad (7)$$

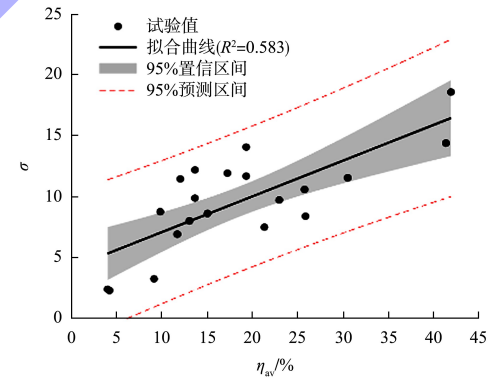
$$\sigma = 29.29\eta_{av} + 4.168 \quad (8)$$



a) 形状参数  $k$



b) 位置参数  $\mu$



c) 尺度参数  $\sigma$

图 6 GEV 分布模型参数与平均截面锈蚀率的关系  
Fig. 6 Relationship between GEV distribution model parameters and average cross-section corrosion rates

不同锈蚀程度下钢筋残余截面积相对值概率密度分布曲线见图 7。可以看到, 分布曲线均呈现出负偏态特征, 且曲线左侧尾部更重, 说明 GEV



分布模型中出现严重锈蚀截面的概率更大。同时，曲线峰度随着锈蚀程度的增加先增大后减小，这一变化模式反映了锈蚀过程中钢筋性能数据分布形态的复杂变化。峰度的增大表明在锈蚀初期，由于局部点蚀特征明显，数据分布呈现出较为尖锐的形态；而随着锈蚀的进一步发展，锈胀开裂导致锈蚀的普遍性和均匀性增加，数据分布形态逐渐变得平缓，峰度也随之减小，此时锈蚀钢筋可能出现的最小残余截面积与平均截面积之比减小。因此，GEV分布模型能很好地反映出氯盐侵蚀环境下锈蚀钢筋的局部点蚀特征及其变化趋势，从而能够更加准确地评估锈蚀钢筋的力学性能。

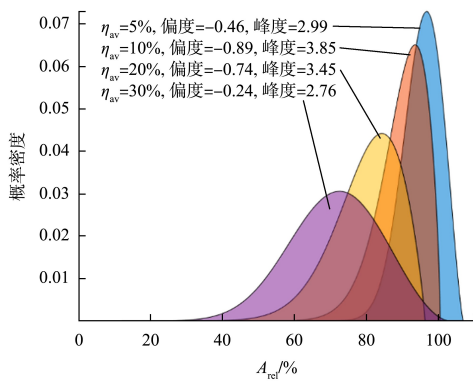


图7 不同锈蚀程度下钢筋残余截面积 GEV 概率密度分布曲线

Fig. 7 GEV probability density distribution curve of residual cross-sectional area of corroded reinforcements under different corrosion degrees

### 3 构件截面钢筋锈蚀率计算及构件承载力分析

#### 3.1 构件截面钢筋锈蚀率计算

现有的评估方法主要关注构件内所有受力钢筋的综合平均锈蚀率，即构件整体钢筋锈蚀率  $\eta_{AV}$ ，无法准确评估出在役构件的剩余承载能力。因此，本文考虑钢筋锈蚀的随机性和相关性，将构件可能出现的最危险截面处所有受力钢筋综合截面锈蚀率，即构件截面钢筋锈蚀率  $\eta_{SC}$ ，作为锈蚀钢筋混凝土梁承载力评估中的构件锈蚀率指标。

假设同一构件内受拉钢筋的平均截面锈蚀率  $\eta_{AV}$  和残余截面积概率分布模型相同，则同一构件内所有受拉钢筋的整体锈蚀特征相近，可近似认

为  $\eta_{av} = \eta_{AV}$ 。同时，在长期的工程实践中观察到，当构件表面存在显著的大面积网状裂缝、混凝土剥落等明显病害时，构件内各钢筋间的锈蚀往往呈现出强相关性，可将其视作为一根整体钢筋评估该构件的剩余承载力。相反，如果构件表面无明显病害迹象，那么可认为构件内各钢筋间的锈蚀不具有显著的相关性，可通过计算构件同一截面处所有受力钢筋截面锈蚀率的综合平均值  $\bar{\eta}_{sc}$  而得到  $\eta_{SC}$ 。

基于上述分析，考虑  $\eta_{AV}$  为 4%~30%，构件内受拉钢筋数量  $N_{bar}$  分别为 1、4、6、8、10、12 根，采用 Monte-Carlo 抽样算法分别模拟生成构件内同一截面处各受力钢筋的截面积，建立同一构件截面处所有受拉钢筋截面锈蚀率的综合平均值  $\bar{\eta}_{sc}$  的随机样本分布模型。其中  $N_{bar} = 1$  根表示构件表面存在显著的大面积网状裂缝、混凝土剥落等明显病害的情况。根据评估需求，考虑最不利的情况，取 95% 分位数作为本文的构件截面钢筋锈蚀率  $\eta_{SC}$ 。  $\eta_{SC}$  的计算流程见图 8。

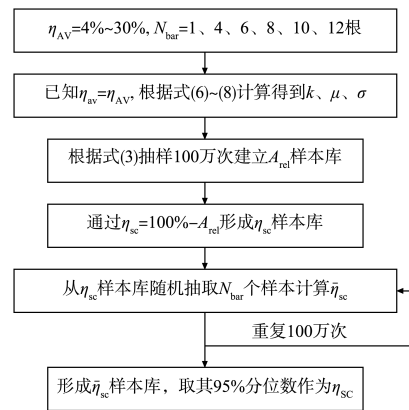


图8  $\eta_{SC}$  的计算流程

Fig. 8 Calculation process for  $\eta_{SC}$

定义构件截面钢筋锈蚀率与构件整体钢筋锈蚀率之比为构件锈损系数  $\alpha = \eta_{SC} / \eta_{AV}$ 。基于 GEV 模型计算所得的  $\alpha$  值见表 2，其随  $\eta_{AV}$  和  $N_{bar}$  的变化趋势见图 9。可以看出， $\alpha$  随  $\eta_{AV}$ 、 $N_{bar}$  的增大而减小。当  $N_{bar} = 1$  时， $\alpha$  随着锈蚀程度增大的变化规律与中锈蚀钢筋残余截面积的 GEV 分布的变

化特性有关(图 7), 即锈蚀钢筋混凝土构件中可能出现的最危险钢筋锈损截面与其整体平均钢筋锈损截面之比随着锈蚀程度增大而减小。另一方面,  $\alpha$  随  $N_{\text{bar}}$  增大而减小的趋势与中心极限定理关于样本均值分布特性的规律一致, 即  $\eta_{\text{AV}}$  一定时,  $N_{\text{bar}}$  的增大会使得  $\bar{\eta}_{\text{sc}}$  样本分布更为集中(图 10), 从而使  $\eta_{\text{sc}}$  的取值相对减小。随着  $N_{\text{bar}}$  增大,  $\alpha$  随锈蚀发展的下降趋势也逐渐平缓, 说明构件内部受力钢筋数量的增加对减缓海洋环境下构件因锈蚀引起的性能退化具有积极作用。

表 2 不同构件整体钢筋锈蚀率和构件受拉钢筋数量下构件锈损系数  $\alpha$  的计算结果

Tab. 2 Calculation results of member corrosion damage coefficients  $\alpha$  under different overall reinforcement corrosion rates and tensile reinforcement quantities

$\eta_{\text{AV}} / \%$	$\alpha$					
	$N_{\text{bar}} = 1$ 根	$N_{\text{bar}} = 4$ 根	$N_{\text{bar}} = 6$ 根	$N_{\text{bar}} = 8$ 根	$N_{\text{bar}} = 10$ 根	$N_{\text{bar}} = 12$ 根
4	3.109	2.216	2.069	1.981	1.916	1.870
6	2.596	1.867	1.738	1.664	1.614	1.574
8	2.323	1.675	1.567	1.495	1.452	1.420
10	2.161	1.568	1.468	1.408	1.368	1.335
12	2.034	1.494	1.400	1.346	1.306	1.279
14	1.967	1.452	1.366	1.313	1.277	1.253
16	1.911	1.427	1.344	1.292	1.259	1.234
18	1.849	1.396	1.318	1.271	1.238	1.215
20	1.801	1.373	1.297	1.253	1.221	1.200
22	1.753	1.348	1.275	1.230	1.203	1.182
24	1.720	1.327	1.263	1.220	1.190	1.171
26	1.688	1.317	1.246	1.207	1.182	1.161
28	1.662	1.306	1.242	1.203	1.176	1.158
30	1.628	1.293	1.229	1.192	1.167	1.149

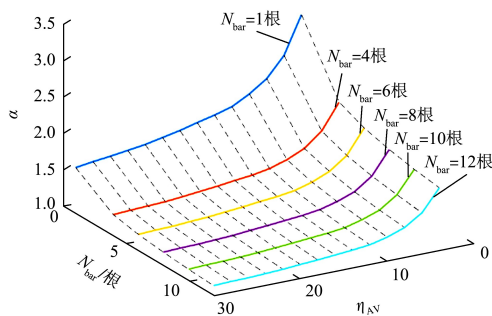
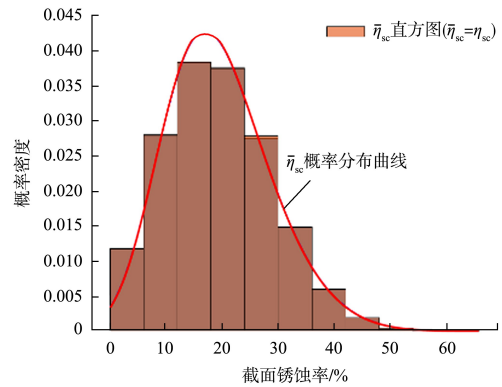
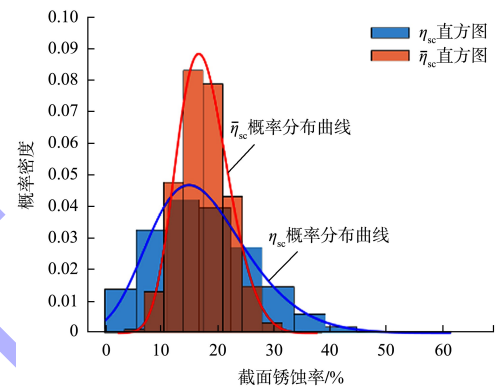


图 9  $\alpha$  的变化趋势

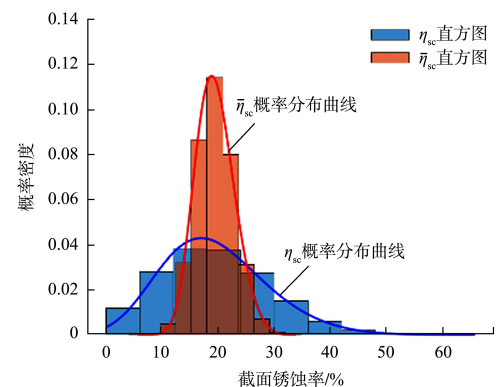
Fig. 9 Variation pattern of  $\alpha$



a)  $N_{\text{bar}} = 1$  根



b)  $N_{\text{bar}} = 4$  根



c)  $N_{\text{bar}} = 8$  根

图 10 当  $\eta_{\text{AV}} = 20\%$  时  $\bar{\eta}_{\text{sc}}$  样本分布形态随  $N_{\text{bar}}$  的变化情况

Fig. 10 Variation of distribution pattern for  $\bar{\eta}_{\text{sc}}$  with  $N_{\text{bar}}$  when  $\eta_{\text{AV}} = 20\%$

### 3.2 构件承载力分析及验证

以锈蚀混凝土钢筋梁正截面抗弯承载力为研究对象, 开展原型构件剩余承载力分析。本文 1.1 节的 6 根原型构件梁的损伤信息统计及其承载力试验结果见表 3, 试验过程见文献[8]。

分别考虑各钢筋间锈蚀强相关和不相关两种情况,对表2的值进行内插得出6根原型构件梁截面锈蚀率 $\eta_{sc}$ 。结合现行GB/T 51355—2019《既有混凝土结构耐久性评定标准》<sup>[9]</sup>给出的计算公式,取材料参数标准值,分别计算出传统基于构件整体钢筋锈蚀率 $\eta_{AV}$ 和本文基于构件截面钢

筋锈蚀率 $\eta_{sc}$ 的6根原型构件梁正截面抗弯承载力计算值及其与试验值之比,并列入表3相应位置。可以看出,在评估构件剩余承载力时,构件钢筋锈蚀的随机性和各钢筋间的锈蚀相关性是不容忽视的关键因素,基于构件截面钢筋锈蚀率的承载力计算方法能够更准确地预测锈蚀构件的剩余承载力。

表3 原型构件梁损伤信息及承载力对比

Tab. 3 Damage information and bearing capacity comparison of prototype member beams

$\eta_{AV}/\%$	$\eta_{sc}/\%$		极限荷载/kN						
			试验值	计算值		计算值/试验值			
	强相关	不相关		标准公式	强相关	不相关	标准公式	强相关	不相关
18.33	34.48	22.94	562	657.25	514.83	616.58	1.17	0.92	1.10
19.92	37.11	24.65	533	625.19	524.32	600.84	1.17	0.98	1.13
19.63	36.63	24.35	572	633.69	495.86	604.19	1.11	0.87	1.06
15.30	29.47	19.62	624	670.00	559.03	645.88	1.07	0.90	1.04
14.10	27.48	18.25	700	662.77	597.94	644.51	0.95	0.85	0.92
20.57	38.18	25.32	552	603.84	494.46	578.57	1.09	0.90	1.05

#### 4 结论

1) 广义极值分布模型对锈蚀钢筋残余截面面积概率分布拟合效果最佳。随着锈蚀程度的增加,其位置参数逐渐减小,尺度参数逐渐增大,而形状参数呈现先减小后增大,然后再减小的变化趋势。

2) 基于Monte-Carlo抽样法计算得到的构件锈损系数 $\alpha$ 随构件整体钢筋锈蚀率的增大和钢筋数量的增加而逐渐减小。构件内部受力钢筋数量的增加对减缓海洋环境下构件因锈蚀引起的性能退化具有积极作用。

3) 在评估构件剩余承载力时,考虑构件内钢筋锈蚀的随机性和各钢筋间的锈蚀相关性更能准确地预测锈蚀构件的剩余承载力,为工程实践中的结构安全评估提供更为可靠的依据。

#### 参考文献:

- [1] TANG F, LIN Z, CHEN G, et al. Three-dimensional corrosion pit measurement and statistical mechanical degradation analysis of deformed steel bars subjected to accelerated corrosion [J]. Construction and building materials, 2014, 70 (15): 104-117.
- [2] KASHANI M M, CREWE A J, ALEXANDER N A. Use of a 3D optical measurement technique for stochastic corrosion pattern analysis of reinforcing bars subjected to accelerated corrosion [J]. Corrosion science, 2013, 73: 208-221.

- [3] CALEYO F, VELÁZQUEZ J C, VALOR A, et al. Probability distribution of pitting corrosion depth and rate in underground pipelines: a Monte Carlo study [J]. Corrosion science, 2009, 51 (9): 1925-1934.
- [4] GU X L, GUO H Y, ZHOU B B, et al. Corrosion non-uniformity of steel bars and reliability of corroded RC beams [J]. Engineering structures, 2018, 167: 188-202.
- [5] ZHANG W P, ZHOU B B, GU X L, et al. Probability distribution model for cross-sectional area of corroded reinforcing steel bars [J]. Journal of materials in civil engineering, 2014, 26 (5): 822-832.
- [6] 刘晋宏, 罗小勇, 肖焱. 钢筋非均匀锈蚀及剩余截面积分布模型 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(11): 83-88.
- [7] ZHANG J Z, HUANG J, FU C Q, et al. Characterization of steel reinforcement corrosion in concrete using 3D laser scanning techniques [J]. Construction and building materials, 2021, 270: 121402.
- [8] YANG S, YING Z, WANG W, et al. Study on crack type characteristics of bearing capacity degradation of prototype members of the high-piled wharf [C]//Association for Computing Machinery. Proceedings of ICI TEE2021. New York: Association for Computing Machinery, 2021: 1-6.
- [9] 西安建筑科技大学, 中交四航工程研究院有限公司. 既有混凝土结构耐久性评定标准: GB/T 51355—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

(本文编辑 王璁)