

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.121



考虑均匀/非均匀锈蚀特征参数的 钢筋力学与变形性能

余波^{a,b,c}, 丁自豪^a, 刘阳^a, 陈正^{a,b,c}

(广西大学 a. 土木建筑工程学院; b. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室;
c. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004)

摘要:开展了 45 个混凝土试件中 135 根加速锈蚀钢筋的单轴拉伸试验, 分别建立了均匀/非均匀锈蚀特征参数与锈蚀钢筋的力学性能参数和变形性能参数之间的定量关系, 进而提出了基于均匀/非均匀锈蚀特征参数的锈蚀钢筋应力-应变关系模型。结果表明: 锈蚀钢筋的力学和变形性能参数与锈蚀特征参数之间的相关性较大, 随着质量锈蚀率、最大截面锈蚀率和最大锈蚀深度相对值的增加呈现线性减小趋势, 而随着最小剩余截面相对值和面积点蚀因子的增大呈现线性增大趋势; 随着钢筋锈蚀程度的增加, 锈蚀钢筋的屈服平台会出现明显退化现象, 当质量锈蚀率、最大截面锈蚀率和最大锈蚀深度相对值分别大于 20%、60% 和 40% 左右或最小剩余截面相对值和面积点蚀因子分别小于 40% 和 60% 左右时, 屈服平台基本消失; 轻度锈蚀钢筋可以利用均匀和非均匀锈蚀特征参数来描述应力-应变关系曲线, 而重度锈蚀钢筋采用非均匀锈蚀特征参数来描述应力-应变关系曲线更合理。

关键词:混凝土; 钢筋; 锈蚀特征参数; 力学性能; 变形性能; 应力-应变关系

中图分类号: TU511.3 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2019)06-0095-09

Mechanical and deformation properties of steel bars based on uniform/non-uniform corrosion characteristic parameters

Yu Bo^{a,b,c}, Ding Zihao^a, Liu Yang^a, Chen Zheng^{a,b,c}

(a. School of Civil Engineering and Architecture; b. Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education; c. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China)

Abstract: Based on the uniaxial tensile tests of 135 accelerated corrosion steel bars from 45 concrete specimens, quantitative relationships between uniform and non-uniform corrosion characteristic parameters of reinforcement bars and the mechanical and deformation parameters were established. Then the stress-

收稿日期: 2019-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(51668008, 51738004); 广西自然科学基金(2018GXNSFAA281344)

作者简介: 余波(1982-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事混凝土耐久性、结构可靠度与结构抗震研究, E-mail: gxuyubo@gxu.edu.cn。

陈正(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: chenzheng@gxu.edu.cn。

Received: 2019-06-19

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51668008, 51738004); Natural Science Foundation of Guangxi (No. 2018GXNSFAA281344)

Author brief: Yu Bo (1982-), professor, doctoral supervisor, main research interests: concrete durability, structural reliability and aseismic design, Email: gxuyubo@gxu.edu.cn.

Chen Zheng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: chenzheng@gxu.edu.cn.

strain model of corroded steel bars based on the above characteristic parameters was proposed. The results show that the correlations between the mechanical/deformation property parameters and the corrosion characteristic parameters of corroded steel bars are relatively high. The above mechanical/deformation property parameters of corroded steel bars decrease linearly with increase of the mass loss ratio, the maximum cross-sectional loss ratio and the relative maximum corrosion depth, while increase with the relative minimum residual cross-sectional area and the area pitting factor. Moreover, the yielding platform of the corroded steel bars deteriorates obviously with increase of degree of corrosion. When the mass loss ratio, the maximum cross-sectional loss ratio and the relative maximum corrosion depth is greater than 20%, 60% and 40%, respectively, or the relative minimum residual cross-sectional area and the area pitting factor is less than 40% and 60%, respectively, the yielding platform of corroded steel bars almost disappears. Both uniform and non-uniform corrosion characteristic parameters are suitable to describe the stress-strain curves of steel bars with slight corrosion, while the non-uniform corrosion characteristic parameters are more suitable for steel bars with severe corrosion.

Keywords: concrete; steel bar; corrosion characteristic parameters; mechanical property; deformation performance; stress-strain relationship

混凝土中钢筋时常发生锈蚀,不仅会减小钢筋的有效承载面积,而且还会对钢筋的屈服强度、极限强度、屈服应变、极限应变等力学和变形性能产生显著影响。因此,准确、全面地分析锈蚀钢筋的力学和变形性能,对于在役钢筋混凝土结构的耐久性分析和安全性评估具有重要意义。

围绕锈蚀钢筋的力学和变形性能已开展了大量试验研究。其中,文献[1-6]分析了质量锈蚀率与锈蚀钢筋的屈服强度、极限强度、极限应变、屈服平台长度等力学和变形性能参数之间的关系;Kashani等[7]分析了质量锈蚀率对受拉钢筋延性的影响;张伟平等[8-9]分析了平均截面锈蚀率与锈蚀钢筋的力学与变形性能之间的关系。由于上述质量锈蚀率和平均截面锈蚀率只能从平均意义上描述钢筋的锈蚀程度,所以,只适用于均匀锈蚀的情况。然而,混凝土属于典型的非均质材料,其内部随机分布的骨料、孔隙和裂缝等导致混凝土中钢筋的空间锈蚀分布形态具有显著的非均匀性^[10-11]。因此,利用最大截面锈蚀率、最小剩余截面积和点蚀因子等特征参数能够更加合理地描述钢筋的非均匀锈蚀程度。对此,罗小勇等^[12]、Lu等^[13]分析了最大截面锈蚀率与锈蚀钢筋的力学和变形性能之间的关系;曲福来等^[14]分析了各微段的最大质量锈蚀率与锈蚀钢筋的屈服强度、极限强度和伸长率之间的关系;孙晓燕等^[15]建立了最小剩余截面积相对值与锈蚀钢筋的屈服强度相对值、极限强度相对值和伸长率之间的关系;Zhu等^[16]分析了最大截面锈蚀率对锈蚀钢筋延性

的影响;Sheng等^[17]研究了锈坑形状、深度和分布对钢筋的极限强度、屈服强度和伸长率的影响;Tang等^[18]分析了最小剩余截面积与锈蚀钢筋的力学和变形性能之间的关系;Lu等^[19]、Imperatore等^[20]分析了面积点蚀因子对锈蚀钢筋的屈服强度、极限强度和伸长率的影响;Balestra等^[21]分析了最小直径对锈蚀钢筋的屈服强度、极限强度和伸长率的影响。由此可见,目前的研究成果大多局限于单一或有限的锈蚀特征参数分析,难以准确、全面地描述钢筋的均匀/非均匀锈蚀形态对力学和变形性能的影响。因此,有必要进一步开展考虑均匀/非均匀锈蚀特征参数的钢筋力学和变形性能分析研究。

笔者首先开展了45个混凝土试件中135根加速锈蚀钢筋的单轴拉伸试验,然后,基于试验数据分别建立了均匀锈蚀特征参数(质量锈蚀率)和非均匀锈蚀特征参数(包括最大截面锈蚀率、最大锈蚀深度相对值、最小剩余截面积相对值和面积点蚀因子)与锈蚀钢筋的力学性能参数(包括名义屈服强度相对值和名义极限强度相对值)和变形性能参数(包括屈服应变相对值、极限应变相对值和屈服平台长度相对值)之间的定量关系,进而分别建立了基于上述锈蚀特征参数的锈蚀钢筋应力-应变关系模型,并与试验数据进行了验证分析。

1 钢筋的加速锈蚀与拉伸试验

本文试验与余波等^[22]试验基于同一批试件开展,但二者的试验内容和研究侧重点存在明显区别。

其中,文献[22]重点关注混凝土中钢筋的空间锈蚀形态测试装置和空间锈蚀特征参数分析方法,而本文重点开展锈蚀钢筋的单轴拉伸试验。

1.1 混凝土中钢筋的加速锈蚀试验

如图1所示,共制作45个长、宽和高分别为500、 $d+30$ 和150 mm的混凝土试件^[22]。其中, d 为钢筋直径。混凝土中共埋设135根钢筋,包括直径为8和12 mm的HPB300级光圆钢筋各18根,直径为12 mm的HRB400E级带肋钢筋18根,以及直径为16 mm的HRB400E级带肋钢筋81根。每个试件沿高度方向等间距放置3根钢筋。混凝土强度等级为C30,混凝土配合比和钢筋的性能参数信息见文献[22]。待锈蚀钢筋的长度为450 mm,钢筋在加工完后经过酸洗、烘干、称重获取钢筋锈蚀前的质量 M_0 。在混凝土试件的两端表面涂3层环氧树脂,以防止NaCl溶液从混凝土端部渗入混凝土内部,待环氧树脂凝固后,将试件放入温度为 $20\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度为95%的标准养护室中养护7 d。试验采用外加直流电的方法加速混凝土中的钢筋锈蚀,通过控制通电时间可以得到不同锈蚀程度的钢筋^[22]。通电结束后,对混凝土试件进行破型,取出锈蚀钢筋,经过酸洗、干燥、称重等步骤,获取钢筋锈蚀后的质量 M_1 。

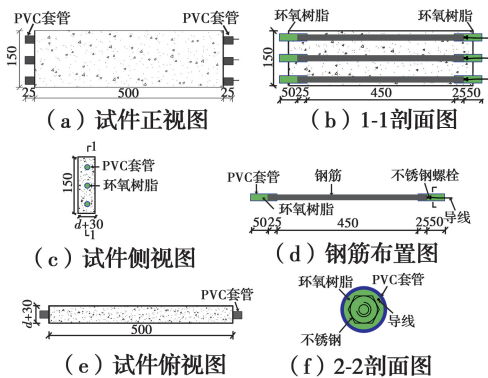


图1 混凝土试件的钢筋设置示意图

Fig. 1 Illustration of reinforcement arrangement for concrete specimens

利用自主研发的连续获取钢筋全角度锈蚀形态图像的测试装置^[23]来获取钢筋的非均匀锈蚀形态,该装置主要由底座、钢筋固定装置、钢筋驱动装置、调节支架和数码相机等组成。利用该装置可以获得钢筋的非均匀锈蚀形态图像(识别精度为0.1 mm),并获得钢筋全角度锈蚀轮廓的上、下边缘线到轴线的距离 r_i^k 和 r_{n+1+i}^k 及其对应的角度 α_i 和 α_{n+1+i} ($i=0, 1, 2, \dots, n$,为旋转角度的编号; $k=1, 2, 3, \dots,$

m ,为沿钢筋纵向的控制截面编号; n 和 m 分别为旋转总次数和控制截面总数),以及锈蚀钢筋控制截面的剩余截面积 S_k ,进而可以计算钢筋的均匀锈蚀特征参数(质量锈蚀率 $\eta_{m,a}$)和非均匀锈蚀特征参数(包括最大截面锈蚀率 $\eta_{s,max}$ 、最小剩余截面积 S_{min} 、最大锈蚀深度 D_{max} 和面积点蚀因子 P_s)^[22]。

$$\eta_{m,a} = \frac{M_0 - M_1}{M_0}; \eta_{s,max} = \frac{S_0 - S_{min}}{S_0}; D_{max} = r_0 - r_{min} \quad (1)$$

$$S_{min} = \min(S_1, S_2, \dots, S_m); P_s = \frac{S_{min}}{S} \quad (2)$$

式中: S_0 和 r_0 分别为未锈蚀钢筋的横截面积和半径; S_{min} 、 \bar{S} 和 r_{min} 分别为锈蚀钢筋的最小剩余截面积、平均剩余截面积和最小剩余半径。

1.2 锈蚀钢筋的拉伸试验

根据金属材料拉伸试验规范^[24]的操作规定,采用WAW-600型微机控制电液伺服万能试验机开展锈蚀钢筋的轴向拉伸试验。用钢筋打点机每隔10 mm对待测钢筋进行打点处理,并用油性笔在钢筋锈蚀最严重部位的5倍公称直径范围两端做标记。通过轴向拉伸试验,可以获得不同锈蚀程度钢筋的荷载-位移曲线,如图2所示。编号 P 和 R 分别表示HPB300级钢筋和HRB400E级钢筋,后面的数字代表钢筋直径, M_i ($i=1, 2, 3, \dots, 9$)表示9种混凝土试件的配合比,A、B、C分别表示在每种配合比条件下的3组混凝土试件, $-A_i$ ($i=1, 2, 3$)表示每个

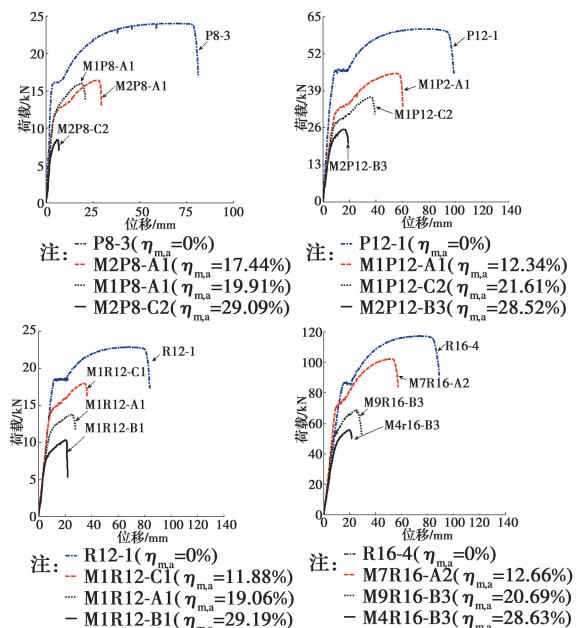


图2 锈蚀钢筋的荷载-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of corrosion steel bars

混凝土试件中不同位置钢筋的编号, $-i$ ($i=1, 2, 3, \dots, 5$) 表示未锈蚀钢筋的编号。由图 2 可知, 随着质量锈蚀率的增加, 钢筋的屈服荷载和极限荷载及其对应的位移都逐渐降低, 屈服平台也随着质量锈蚀率的增加而逐渐减小, 甚至消失。此外, 质量锈蚀率对锈蚀钢筋荷载-位移曲线在弹性阶段的斜率影响相对较小。

1.3 锈蚀钢筋的力学和变形性能参数

根据图 2 中不同锈蚀程度钢筋的荷载-位移曲线, 可以确定钢筋锈蚀前后的应力-应变曲线, 如图 3 所示。基于 Park-Paulay 模型^[25], 可以将锈蚀钢筋的应力-应变曲线划分为弹性段、屈服平台段及强化段, 对应的应力-应变曲线为

$$\sigma_s = \begin{cases} \epsilon_s E_s & ; 0 < \epsilon_s \leq \epsilon_{yc} \\ f_{yc} & ; \epsilon_{yc} < \epsilon_s \leq \epsilon_{hc} \\ f_{yc} \left[\frac{m\zeta + 2}{60\zeta + 2} + \frac{\zeta(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right] & ; \epsilon_{hc} < \epsilon_s \leq \epsilon_{uc} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $m = \frac{(f_{uc}/f_{yc})(30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2}$; $r = \epsilon_{uc} - \epsilon_{hc}$;

$\zeta = \epsilon_s - \epsilon_{hc}$; E_s 为锈蚀钢筋的弹性模量; σ_s 和 ϵ_s 分别为锈蚀钢筋的应力和应变; f_{yc} 和 f_{uc} 分别为锈蚀钢筋的名义屈服强度与名义极限强度。

$$f_{yc} = \alpha_{yc} f_{y0} = \alpha_{yc} \frac{F_{y0}}{A_0}; f_{uc} = \alpha_{uc} f_{u0} = \alpha_{uc} \frac{F_{u0}}{A_0} \quad (4)$$

式中: f_{y0} 和 f_{u0} 分别为未锈蚀钢筋的名义屈服强度与名义极限强度; α_{yc} 和 α_{uc} 分别为锈蚀钢筋的名义屈服强度相对值和名义极限强度相对值; F_{y0} 和 F_{u0} 分别为未锈蚀钢筋的屈服荷载和极限荷载; A_0 为未锈蚀钢筋的公称截面积。

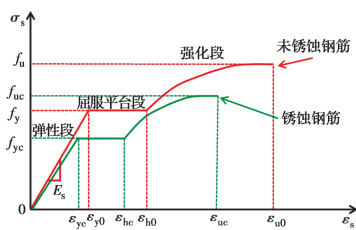


图 3 钢筋锈蚀前后的应力-应变关系示意图

Fig. 3 Illustration of stress-strain relationship of steel bars before and after corrosion

式(3)中 ϵ_{yc} 、 ϵ_{uc} 、 ϵ_{hc} 和 $\Delta\epsilon_c$ 分别为锈蚀钢筋的屈服应变、极限应变、强化应变和屈服平台长度应变, 可以分别描述为

$$\epsilon_{yc} = \epsilon_{y0} \times \alpha_{ey}; \epsilon_{uc} = \epsilon_{u0} \times \alpha_{eu} \quad (5)$$

$$\Delta\epsilon_c = \Delta\epsilon_0 \times \Delta\epsilon; \epsilon_{hc} = \Delta\epsilon_c + \epsilon_{yc} \quad (6)$$

式中: α_{ey} 、 α_{eu} 和 $\Delta\epsilon$ 分别为锈蚀钢筋的屈服应变相对值、极限应变相对值和屈服平台长度相对值; ϵ_{y0} 、 ϵ_{u0} 和 $\Delta\epsilon_0$ 分别为未锈蚀钢筋的屈服应变、极限应变和屈服平台长度应变。

由式(3)~式(6)可知, 要确定不同锈蚀程度钢筋的应力-应变曲线, 首先需要确定锈蚀钢筋的力学性能参数(名义屈服强度 f_{yc} 与名义极限强度 f_{uc})和变形性能参数(屈服应变 ϵ_{yc} 、极限应变 ϵ_{uc} 、强化应变 ϵ_{hc} 和屈服平台长度应变 $\Delta\epsilon_c$), 其核心和关键是建立钢筋锈蚀特征参数(包括质量锈蚀率 $\eta_{m,a}$ 、最大截面锈蚀率 $\eta_{s,max}$ 、最小剩余截面积 S_{min} 、最大锈蚀深度 D_{max} 和面积点蚀因子 P_s)与名义屈服强度相对值 α_{yc} 、名义极限强度相对值 α_{uc} 、屈服应变相对值 α_{ey} 、极限应变相对值 α_{eu} 和屈服平台长度相对值 $\Delta\epsilon$ 之间的定量关系。

2 锈蚀钢筋的力学性能分析

分析了钢筋的均匀锈蚀特征参数 $\eta_{m,a}$ 和非均匀锈蚀特征参数(包括 $\eta_{s,max}$ 、 P_s 、最大锈蚀深度相对值 $\alpha_{d,max} = D_{max}/d$ 、最小剩余截面积相对值 $\alpha_{s,min} = S_{min}/S_0$)与锈蚀钢筋的名义屈服强度相对值 α_{yc} 和名义极限强度相对值 α_{uc} 之间的相关性。分析结果表明, 是否对光圆钢筋和带肋钢筋进行分类分析对结果影响不明显, 但分类后需要针对两类钢筋分别建立不同的预测模型, 不便于工程应用。综合考虑计算精度和简便性, 本文暂不区分钢筋类别的影响。如图 4 和图 5 所示, 随着 $\eta_{m,a}$ 、 $\eta_{s,max}$ 和 $\alpha_{d,max}$ 的增加, α_{yc} 和 α_{uc} 呈线性减小趋势。其中, α_{yc} 和 α_{uc} 与 $\eta_{m,a}$ 之间预测方程的斜率绝对值相对较大, 说明随着 $\eta_{m,a}$ 的增加, α_{yc} 和 α_{uc} 下降趋势较为明显。同时, 随着 $\alpha_{s,min}$ 和 P_s 的增加, α_{yc} 和 α_{uc} 呈线性增加趋势。其中, 与 $\alpha_{s,min}$ 相比, α_{yc} 和 α_{uc} 与 P_s 之间预测方程的斜率相对较大, 说明随着 P_s 的增加, α_{yc} 和 α_{uc} 增大趋势更为明显。

此外, 由于钢筋锈蚀特征参数与 α_{yc} 和 α_{uc} 之间的预测方程非常接近, 为了便于使用, 可以建立钢筋锈蚀特征参数与 α_{yc} 和 α_{uc} 之间的统一预测方程, 如图 6 所示。图 6 中, k 为名义屈服强度和名义极限强度在钢筋锈蚀前后的相对值(统称为名义强度相对值)。

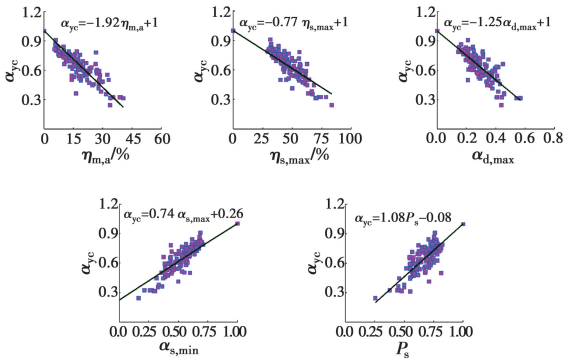


图 4 锈蚀特征参数与名义屈服强度相对值的相关性
Fig. 4 Correlation between corrosion characteristic parameters and relative nominal yield strength

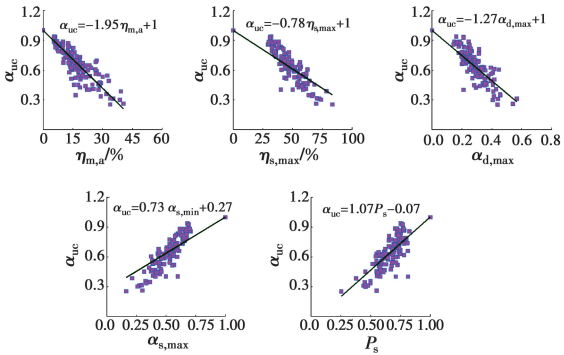


图 5 锈蚀特征参数与名义极限强度相对值的相关性
Fig. 5 Correlation between corrosion characteristic parameters and relative nominal ultimate strength

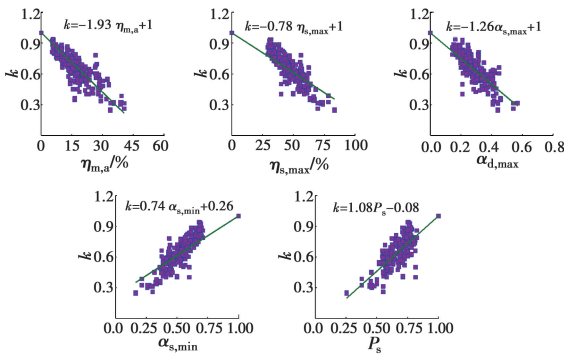


图 6 锈蚀特征参数与名义强度相对值的相关性
Fig. 6 Correlation between corrosion characteristic parameters and relative nominal strength

3 锈蚀钢筋的变形性能分析

3.1 屈服应变和极限应变

与力学性能分析类似,暂不考虑钢筋类别的影响,均匀/非均匀锈蚀特征参数(包括 $\eta_{m,a}$ 、 $\eta_{s,max}$ 、 $\alpha_{d,max}$ 、 $\alpha_{s,min}$ 和 P_s)与锈蚀钢筋的屈服应变相对值 α_{ey} 和极限应变相对值 α_{eu} 之间的相关性分别如图 7 和

图 8 所示。由图 7 和图 8 可知,随着 $\eta_{m,a}$ 、 $\eta_{s,max}$ 和 $\alpha_{d,max}$ 的增加, α_{ey} 和 α_{eu} 呈线性减小趋势;随着 $\alpha_{s,min}$ 和 P_s 的增加, α_{ey} 和 α_{eu} 呈线性增加趋势。其中, α_{ey} 和 α_{eu} 与 $\eta_{m,a}$ 预测方程的斜率绝对值相对较大,说明随着 $\eta_{m,a}$ 的增加, α_{ey} 和 α_{eu} 的变化趋势更为明显。此外,与 α_{ey} 相比,锈蚀特征参数(包括 $\eta_{m,a}$ 、 $\eta_{s,max}$ 、 $\alpha_{d,max}$ 、 $\alpha_{s,min}$ 和 P_s)与 α_{eu} 之间预测方程的斜率绝对值相对更大,说明锈蚀特征参数对 α_{eu} 的影响更为显著。

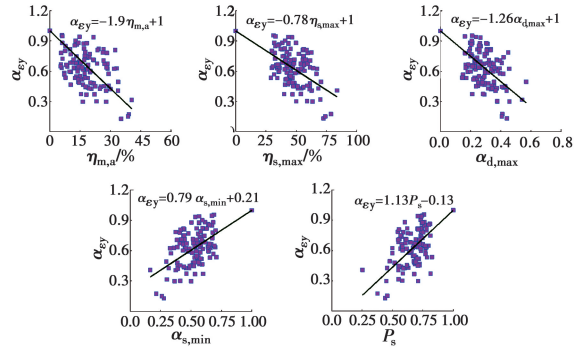


图 7 锈蚀特征参数与屈服应变相对值之间的相关性
Fig. 7 Correlation between corrosion characteristic parameters and relative yield strain

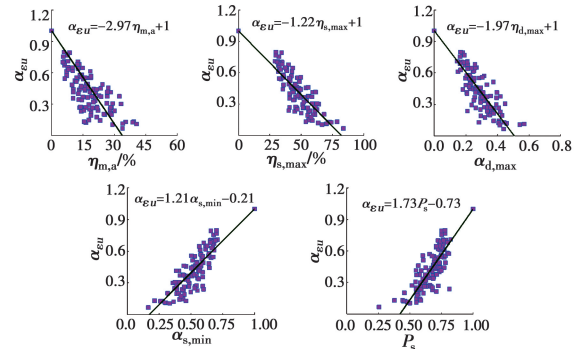


图 8 锈蚀特征参数与极限应变相对值之间的相关性
Fig. 8 Correlation between corrosion characteristic parameters and relative ultimate strain

3.2 屈服平台长度

钢筋的均匀/非均匀锈蚀特征参数(包括 $\eta_{m,a}$ 、 $\eta_{s,max}$ 、 $\alpha_{d,max}$ 、 $\alpha_{s,min}$ 和 P_s)与锈蚀钢筋的屈服平台长度相对值 $\Delta\epsilon$ 之间的相关性如图 9 所示。由图 9 可知, $\Delta\epsilon$ 随着 $\eta_{m,a}$ 、 $\eta_{s,max}$ 和 $\alpha_{d,max}$ 的增加而逐渐降低,随着 $\alpha_{s,min}$ 和 P_s 的增加而逐渐增大。锈蚀钢筋的屈服平台长度相对值 $\Delta\epsilon$ 与锈蚀特征参数之间的定量关系,可以确定当屈服平台基本消失(即 $\Delta\epsilon = 0$)时各锈蚀特征参数的临界值,即当 $\eta_{m,a}$ 、 $\eta_{s,max}$ 、 $\alpha_{d,max}$ 分别大于 20%、60%和 40%左右或 $\alpha_{s,min}$ 和 P_s 分别小于 40%和 60%左右时,锈蚀钢筋的屈服平台基本消失。由

此可见,随着钢筋锈蚀程度的增加,锈蚀钢筋的屈服平台会出现明显退化现象,对于锈蚀严重的钢筋,其屈服平台可能完全消失。

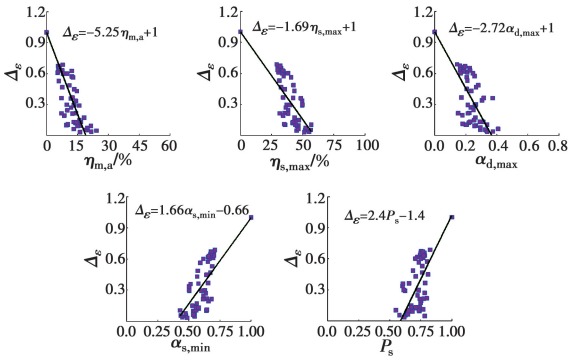


图 9 锈蚀特征参数与屈服平台长度相对值之间的相关性

Fig. 9 Correlation between corrosion characteristic parameters and relative yield plateau length

3.3 应力-应变曲线

基于图 6~图 9 中建立的均匀/非均匀锈蚀特征参数(包括 $\eta_{m,a}$ 、 $\eta_{s,max}$ 、 $\alpha_{d,max}$ 、 $\alpha_{s,min}$ 和 P_s)与锈蚀钢筋的名义屈服强度相对值 α_{yc} 、名义极限强度相对值 α_{uc} 、屈服应变相对值 α_{ey} 、极限应变相对值 α_{eu} 和屈服平台长度相对值 $\Delta\epsilon$ 之间的定量关系,结合式(4)~式(6),可以计算不同锈蚀程度钢筋的力学性能参数(名义屈服强度 f_{yc} 和名义极限强度 f_{uc})和变形性能参数(屈服应变 ϵ_{yc} 、极限应变 ϵ_{uc} 、强化应变 ϵ_{hc} 和屈服

平台长度应变 $\Delta\epsilon_c$),见表 1。进而根据式(3)可以分别以上述锈蚀特征参数作为控制参数,建立锈蚀钢筋的应力-应变关系模型。从 135 根试验钢筋中任意选取 5 根光圆钢筋(如 M1P12-A2、M1P12-A3、M1P8-C2、M1P12-B2、M2P12-A3)和 5 根带肋钢筋(如 M9R16-C1、M3R16-C1、M2R16-B3、M1R12-A2、M1R16-C1)进行对比分析,应力-应变关系曲线的模型计算值与实验测试值的对比分析如图 10 所示。由图 10 可知,当钢筋锈蚀程度较低(如低于 10%)时,可以利用均匀锈蚀特征参数($\eta_{m,a}$)和非均匀锈蚀特征参数($\eta_{s,max}$ 、 $\alpha_{d,max}$ 、 $\alpha_{s,min}$ 和 P_s)作为控制参数描述锈蚀钢筋的应力-应变关系曲线;而当钢筋发生重度锈蚀(如 $\eta_{m,a}$ 大于 25%)时,利用非均匀锈蚀特征参数($\eta_{s,max}$ 、 $\alpha_{d,max}$ 、 $\alpha_{s,min}$ 和 P_s)作为控制参数可以更好地描述锈蚀钢筋的应力-应变关系曲线。同时,从文献[1,14]中任意选取了 5 组以质量锈蚀率为特征参数的试验数据(编号为 SD-10、SG-2、SG-6、R16-D 和 P12-E),结合文献[8]的应力-应变关系模型,对本文模型开展对比验证分析,如图 11 所示。图 11 中,P1 表示本文型,P2 表示文献[8]模型。由图 11 可知,文献[8]模型和本文模型的预测结果与实验数据总体吻合较好,但是本文模型的应力应变曲线与实验数据更加接近,说明本文模型具有较好的预测精度和适用性。

表 1 锈蚀特征参数与钢筋的力学和变形性能参数之间的定量关系

Table 1 Quantitative relationship between corrosion characteristic parameters and mechanical/deformation parameters of steel bar

| 锈蚀特征参数 | 强度 | 应变 |
|------------------|--|--|
| $\eta_{m,a}$ | $f_{yc} = k f_{y0}; f_{uc} = k f_{u0};$ $k = 1 - 1.93\eta_{m,a}$ | $\epsilon_{yc} = (1 - 1.9\eta_{m,a})\epsilon_{y0}; \Delta\epsilon_c = (1 - 5.25\eta_{m,a})\Delta\epsilon_0;$ $\epsilon_{uc} = (1 - 2.97\eta_{m,a})\epsilon_{u0}; \epsilon_{hc} = \begin{cases} \epsilon_{yc} + \Delta\epsilon_c; & \eta_{m,a} \leq 20\% \\ \epsilon_{yc} & ; \eta_{m,a} > 20\% \end{cases}$ |
| $\eta_{s,max}$ | $f_{yc} = k f_{y0}; f_{uc} = k f_{u0};$ $k = 1 - 0.78\eta_{s,max}$ | $\epsilon_{yc} = (1 - 0.78\eta_{s,max})\epsilon_{y0}; \Delta\epsilon_c = (1 - 1.69\eta_{s,max})\Delta\epsilon_0;$ $\epsilon_{uc} = (1 - 1.22\eta_{s,max})\epsilon_{u0}; \epsilon_{hc} = \begin{cases} \epsilon_{yc} + \Delta\epsilon_c; & \eta_{s,max} \leq 60\% \\ \epsilon_{yc} & ; \eta_{s,max} > 60\% \end{cases}$ |
| $\alpha_{s,min}$ | $f_{yc} = k f_{y0}; f_{uc} = k f_{u0};$ $k = 0.26 + 0.74\alpha_{s,min}$ | $\epsilon_{yc} = (0.21 + 0.79\alpha_{s,min})\epsilon_{y0}; \Delta\epsilon_c = (-0.66 + 1.66\alpha_{s,min})\Delta\epsilon_0;$ $\epsilon_{uc} = (-0.21 + 1.21\alpha_{s,min})\epsilon_{u0}; \epsilon_{hc} = \begin{cases} \epsilon_{yc} + \Delta\epsilon_c; & \alpha_{s,min} \leq 40\% \\ \epsilon_{yc} & ; \alpha_{s,min} > 40\% \end{cases}$ |
| P_s | $f_{yc} = k f_{y0}; f_{uc} = k f_{u0};$ $k = -0.08 + 1.08P_s$ | $\epsilon_{yc} = (-0.13 + 1.13P_s)\epsilon_{y0}; \Delta\epsilon_c = (-1.4 + 2.4P_s)\Delta\epsilon_0;$ $\epsilon_{uc} = (-0.73 + 1.73P_s)\epsilon_{u0}; \epsilon_{hc} = \begin{cases} \epsilon_{yc} + \Delta\epsilon_c; & P_s \geq 60\% \\ \epsilon_{yc} & ; P_s < 60\% \end{cases}$ |
| $\alpha_{d,max}$ | $f_{yc} = k f_{y0}; f_{uc} = k f_{u0};$ $k = 1 - 1.26\alpha_{d,max}$ | $\epsilon_{yc} = (1 - 1.26\alpha_{d,max})\epsilon_{y0}; \Delta\epsilon_c = (1 - 2.72\alpha_{d,max})\Delta\epsilon_0;$ $\epsilon_{uc} = (1 - 1.97\alpha_{d,max})\epsilon_{u0}; \epsilon_{hc} = \begin{cases} \epsilon_{yc} + \Delta\epsilon_c; & \alpha_{d,max} \geq 40\% \\ \epsilon_{yc} & ; \alpha_{d,max} < 40\% \end{cases}$ |

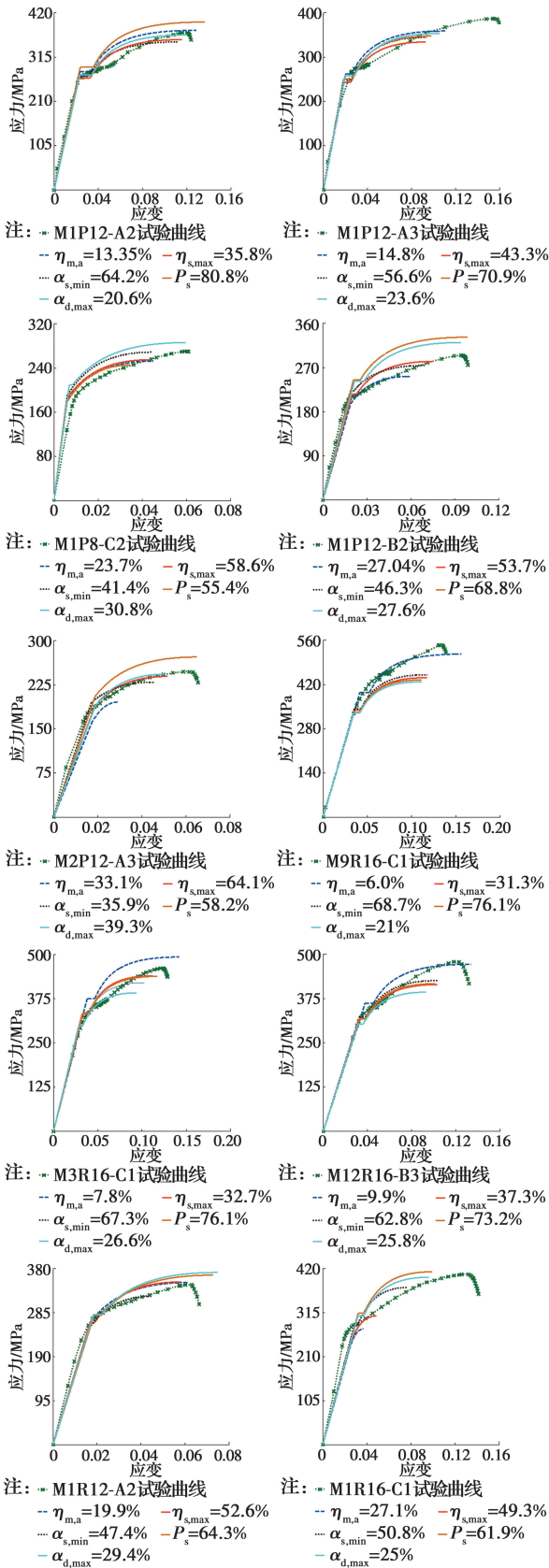


图 10 锈蚀钢筋应力-应变曲线的试验值与模型计算值的对比分析

Fig. 10 Comparison between tested and calculated stress-strain curves of corroded steel bars

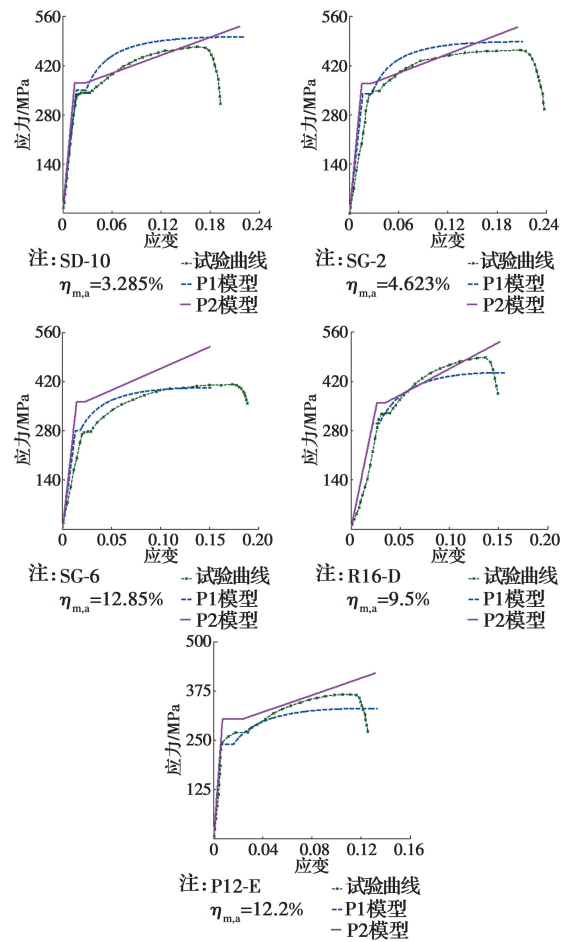


图 11 锈蚀钢筋应力-应变曲线模型的验证

Fig. 11 Validation of stress-strain curves of corroded steel bars

4 结论

1) 锈蚀钢筋的力学和变形性能参数与锈蚀特征参数之间的相关性较大,且随着质量锈蚀率、最大截面锈蚀率和最大锈蚀深度相对值的增加呈现线性减小趋势,而随着最小剩余截面面积相对值和面积点蚀因子的增大呈现线性增大趋势。与锈蚀钢筋的力学性能参数相比,锈蚀钢筋的变形性能参数与锈蚀特征参数之间的离散性相对更大。

2) 随着钢筋锈蚀程度的增加,锈蚀钢筋的屈服平台会出现明显退化现象。当质量锈蚀率 $\eta_{m,a}$ 、最大截面锈蚀率 $\eta_{s,max}$ 、最大锈蚀深度相对值 $\alpha_{d,max}$ 分别大于 20%、60% 和 40% 左右或最小剩余截面面积相对值 $\alpha_{s,min}$ 和面积点蚀因子 P_s 分别小于 40% 和 60% 左右时,锈蚀钢筋的屈服平台基本消失。

3) 当钢筋锈蚀程度较低(如 $\eta_{m,a}$ 低于 10%)时,可以利用均匀锈蚀特征参数 $\eta_{m,a}$ 和非均匀锈蚀特征参数($\eta_{s,max}$ 、 $\alpha_{s,min}$ 、 P_s 和 $\alpha_{d,max}$)作为控制参数描述锈

蚀钢筋的应力-应变关系曲线;而当钢筋发生重度锈蚀(如 $\eta_{m,a}$ 大于 25%)时,利用非均匀锈蚀特征参数 ($\eta_{s,max}$ 、 $\alpha_{s,min}$ 、 P_s 和 $\alpha_{d,max}$) 可以更好地描述锈蚀钢筋的应力-应变关系曲线。

参考文献:

- [1] 吴庆, 袁迎曙. 锈蚀钢筋力学性能退化规律试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 42-47.
WU Q, YUAN Y S. Experimental study on the deterioration of mechanical properties of corroded steel bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 42-47. (in Chinese)
- [2] 徐港, 张懂, 刘德富, 等. 氯盐环境下混凝土中锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 水利学报, 2012, 43(4): 452-459.
XU G, ZHANG D, LIU D F, et al. Research on mechanical properties of corroded steel bar in concrete under chloride environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(4): 452-459. (in Chinese)
- [3] 李凤兰, 侯维玲, 侯朋兵. 锈蚀钢筋的力学性能试验研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2013, 34(4): 61-64.
LI F L, HOU W L, HOU P B. Experimental study on mechanical properties of corroded steel bars [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2013, 34(4): 61-64. (in Chinese)
- [4] FERNANDEZ I, BAIRÁN J M, MARÍ A R. Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. Fatigue and σ - ϵ behavior [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 772-783.
- [5] OU Y C, SUSANTO Y T T, ROH H. Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars [J]. Construction and Building Materials, 2016, 103: 93-104.
- [6] MORENO E, COBO A, PALOMO G, et al. Mathematical models to predict the mechanical behavior of reinforcements depending on their degree of corrosion and the diameter of the rebars [J]. Construction and Building Materials, 2014, 61: 156-163.
- [7] KASHANI M M, CREWE A J, ALEXANDER N A. Nonlinear stress-strain behaviour of corrosion-damaged reinforcing bars including inelastic buckling [J]. Engineering Structures, 2013, 48: 417-429.
- [8] 张伟平, 商登峰, 顾祥林. 锈蚀钢筋应力-应变关系研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(5): 586-592.
ZHANG W P, SHANG D F, GU X L. Stress-strain relationship of corroded steel bars [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(5): 586-592. (in Chinese)
- [9] 张伟平, 李崇凯, 顾祥林, 等. 锈蚀钢筋的随机本构关系[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 920-926.
ZHANG W P, LI C K, GU X L, et al. Stochastic model of constitutive relationship for corroded steel bars [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 920-926. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] ZHU W J, FRANÇOIS R, LIU Y. Propagation of corrosion and corrosion patterns of bars embedded in RC beams stored in chloride environment for various periods [J]. Construction and Building Materials, 2017, 145: 147-156.
- [12] 罗小勇, 梁岩, 张艳芳. 重复拉伸荷载下锈蚀钢筋力学性能及本构关系研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(11): 81-86.
LUO X Y, LIANG Y, ZHANG Y F. Study on mechanical property and constitutive relation of corroded steel bars under tension cyclic loading [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2014, 41(11): 81-86. (in Chinese)
- [13] LU Z H, OU Y B, ZHAO Y G, et al. Investigation of corrosion of steel stirrups in reinforced concrete structures [J]. Construction and Building Materials, 2016, 127: 293-305.
- [14] 曲福来, 刘桂荣, 赵顺波, 等. 基于长度表征不均匀锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(3): 566-570.
QU F L, LIU G R, ZHAO S B, et al. Mechanical properties of non-uniformly corroded steel bars based on length characterization [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(3): 566-570. (in Chinese)
- [15] 孙晓燕, 朱建科, 王海龙, 等. 考虑局部锈蚀特征的钢筋性能退化试验研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 804-810.
SUN X Y, ZHU J K, WANG H L, et al. Experimental investigation of performance degradation of corroded rebar considering pitting feature [J].

- Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 804-810. (in Chinese)
- [16] ZHU W J, FRANÇOIS R, POON C S, et al. Influences of corrosion degree and corrosion morphology on the ductility of steel reinforcement [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 297-306.
- [17] SHENG J, XIA J W. Effect of simulated pitting corrosion on the tensile properties of steel [J]. Construction and Building Materials, 2017, 131: 90-100.
- [18] TANG F J, LIN Z B, CHEN G D, 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: 104-117.
- [19] LU C H, YUAN S Q, CHENG P, et al. Mechanical properties of corroded steel bars in pre-cracked concrete suffering from chloride attack [J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 649-660.
- [20] IMPERATORE S, RINALDI Z, DRAGO C. Degradation relationships for the mechanical properties of corroded steel rebars [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 219-230.
- [21] BALESTRA C E T, LIMA M G, MENDES A Z, et al. Effect of corrosion degree on mechanical properties of reinforcements buried for 60 years [J]. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, 2018, 11(3): 474-498.
- [22] 余波, 刘阳, 万伟伟, 等. 混凝土中钢筋空间锈蚀特征参数的测试及分析[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1): 15-23.
- YU B, LIU Y, WAN W W, et al. Test and investigation on spatial corrosion characteristic parameters of reinforcement bar in concrete [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1): 15-23. (in Chinese)
- [23] 余波, 刘阳, 万伟伟, 等. 连续获取钢筋全角度锈蚀形态图像的装置: CN207488197U [P]. 2018-06-12.
- YU B, LIU Y, WAN W W, et al. A device for obtaining continuous images of steel bar rust pattern at full angle: CN207488197U [P]. 2018-06-12. (in Chinese)
- [24] 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Metallic materials-tensile testing Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [25] PARK R, PAULAY T. Reinforced concrete structures [M]. Wiley, 1975.

(编辑 胡玲)