

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202312045



# 不均匀锈蚀钢筋截面分布特征 与拉伸数值模拟

何宝睿<sup>1</sup>, 刘小娟<sup>1,2</sup>, 苏龙辉<sup>3</sup>, 洪秀君<sup>4</sup>, 陈业伟<sup>5</sup>

1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021;
3. 中建协和建设有限公司, 福建 泉州 362700;
4. 福建磊鑫(集团)有限公司, 福建 厦门 361000;
5. 中建四局建设发展有限公司, 福建 厦门 361006

**摘要:** 为研究锈蚀钢筋剩余截面积的分布规律,以及非均匀锈蚀对钢筋力学性能的影响,采用通电加速锈蚀试验获取锈蚀钢筋。通过3D扫描获取锈蚀钢筋的剩余截面积数据和3D实体模型,对剩余截面积进行统计分析,并基于3D扫描模型进行数值模拟。结果表明:剩余截面积沿纵向分布的不均匀性随锈蚀程度增加而显著增强;对平均截面锈蚀率在20.00%以下的钢筋,可采用正态分布模型对其剩余截面积概率分布进行拟合,对平均截面锈蚀率在20.00%以上的钢筋,其剩余截面积概率分布可选用Weibull分布模型;钢筋名义屈服强度、名义极限强度和名义极限应变均随平均截面锈蚀率的增大而降低;在钢筋截面锈损严重处出现应力集中现象,导致锈蚀钢筋力学性能退化。

**关键词:** 非均匀锈蚀; 3D扫描; 截面分布特征; 数值模拟; 力学性能

**中图分类号:** TU 511.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)02-0186-07

## Cross-Section Distribution Feature and Tensile Numerical Simulation of Non-Uniform Corroded Steel Bars

HE Baorui<sup>1</sup>, LIU Xiaojuan<sup>1,2</sup>, SU Longhui<sup>3</sup>,  
HONG Xiujun<sup>4</sup>, CHEN Yewei<sup>5</sup>

1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Key Laboratory of Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
3. China Architectural Xiehe Construction Limited Company, Quanzhou 362700, China;
4. Fujian Leixin (Group) Limited Company, Xiamen 361000, China;
5. China Architectural Fourth Bureau Construction Development Limited Company, Xiamen 361006, China)

**Abstract:** To study the distribution of residual cross-sectional area of corroded steel bars and the effect of non-uniform corrosion on the mechanical properties of steel bars, the corroded steel bars are obtained by electric accelerated corrosion test. The residual cross-sectional area data and 3D solid model of the corroded steel

**收稿日期:** 2023-12-29

**通信作者:** 刘小娟(1985-),女,博士,副教授,主要从事混凝土结构耐久性 & 工程结构抗震的研究。E-mail:liuxjty@hqu.edu.cn。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51808236, 51978526);福建省自然科学基金资助项目(2021J01282);福建省住房和城乡建设行业科技研究开发项目(2022-K-157, 2022-K-261);华侨大学科研启动费项目(17BS204)

bars are obtained by 3D scanning, the residual cross-sectional area is analyzed statistically, and numerical simulation is carried out base on 3D scanning model. The results show that the non-uniformity of residual cross-sectional area along the longitudinal direction increases significantly with the increase of corrosion degree. For steel bars with average cross-sectional corrosion rate  $<20.00\%$ , the normal distribution model can be used to fit the probability distribution of the residual cross-sectional area, and for steel bars with average cross-sectional corrosion rate  $>20.00\%$ , Weibull distribution model can be used to fit the probability distribution of the residual cross-sectional area. Nominal yield strength, nominal ultimate strength and nominal ultimate strain of steel bars decrease with the increase of average cross-sectional corrosion rate. The stress concentration occurs at areas with severe rust damage, which leads to the degradation of mechanical properties of the corroded steel bars.

**Keywords:** non-uniform corrosion; 3D scanning; cross-sectional distribution feature; numerical simulation; mechanical property

钢筋混凝土结构在服役期间,常常因为混凝土碳化或氯离子侵蚀使内部钢筋脱钝而发生锈蚀,严重劣化了结构性能,危及钢筋混凝土结构的安全性。在实际工程中,由于钢筋锈蚀分布的非均匀性,导致钢筋力学性能退化具有明显的随机性。

目前,国内外学者对锈蚀钢筋表面形貌分布特征的研究已相继展开。Kashani 等<sup>[1]</sup>发现包括点蚀效应在内的锈蚀钢筋几何特性的非均匀分布均可用对数正态分布模型表示。Caprili 等<sup>[2]</sup>发现锈蚀钢筋最大锈蚀深度服从伽玛(Gamma)分布。王晓刚等<sup>[3]</sup>用钢筋区段最大截面锈蚀率与平均截面锈蚀率的比值来反映钢筋锈蚀沿纵向分布的不均匀性,发现该比值服从广义极值分布。Lim 等<sup>[4]</sup>采用 X 射线和数字图像处理技术研究混凝土中钢筋沿纵向锈蚀分布的空间变异性。Li 等<sup>[5]</sup>研究锈蚀钢筋截面半径的概率分布,建立了描述锈蚀钢筋截面半径的正态分布模型。余波等<sup>[6]</sup>定量分析钢筋的质量锈蚀率与最大锈蚀深度、最小剩余截面积、最大截面锈蚀率和点蚀因子等空间锈蚀特征参数之间的相关性。文献[7-8]采用平均截面积与最小截面积之比表征钢筋锈蚀的不均匀性。此外,一些学者对锈蚀钢筋进行数值模拟,研究锈蚀对钢筋力学性能的影响机理。文献[9-10]建立锈蚀钢筋简化模型,研究坑蚀对钢筋力学性能的影响。Hou 等<sup>[11]</sup>建立 3D 半椭球形锈坑模型,研究带有锈坑的钢筋应力分布情况。欧阳祥森等<sup>[12]</sup>建立不同锈蚀率的锈蚀钢筋模型,研究锈蚀钢筋力学性能劣化机理。Sun 等<sup>[13]</sup>将 3D 扫描模型导入 ANSYS 软件,模拟锈蚀钢筋的拉伸试验,研究锈蚀形貌对钢筋力学性能的影响。以上研究大多采用简化模型,无法真实地反映钢筋的锈蚀形貌特征和力学性能退化规律,而采用 3D 扫描技术将锈蚀钢筋的形貌特征导入有限元分析软件,可以更好地揭示不均匀锈蚀钢筋力学性能的退化机理。因此,本文建立锈蚀钢筋有限元模型进行数值模拟,研究非均匀锈蚀形貌特征对锈蚀钢筋力学性能的影响机理。

# 1 试验概况

## 1.1 试件设计

共设计 4 个尺寸为 500 mm×230 mm×100 mm 的钢筋混凝土板,每个试件布置 3 根钢筋,中间 300 mm 为锈蚀段,两端 150 mm 涂抹环氧树脂,防止端部锈蚀严重。试件尺寸及构造,如图 1 所示。

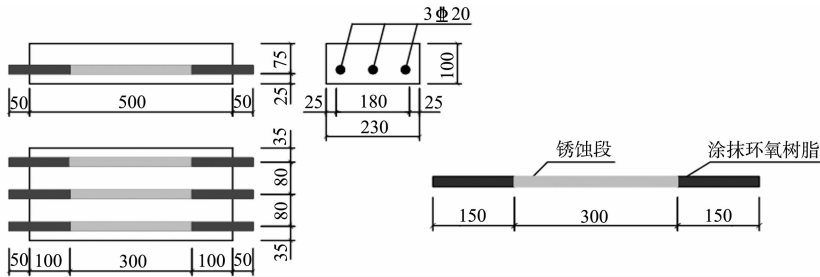


图 1 试件尺寸及构造(单位:mm)

Fig. 1 Size and structure of specimens (unit: mm)

混凝土设计强度等级为 C30,采用直径为 20 mm 的 HRB400 级钢筋,设计 5 个锈蚀率水平。5 组试件 U1~U3,C1~C3,C4~C6,C7~C9,C10~C12 的设计锈蚀率分别为 0%,5%,10%,20%,30%。

1.2 通电锈蚀试验

采用全浸泡通电加速锈蚀法,获取不同锈蚀程度的钢筋。混凝土板养护完成后放入装有 NaCl 溶液(质量分数约为 5%)的锈蚀池中,浸泡 3 d 后进行通电锈蚀。锈蚀装置示意图,如图 2 所示。

电流密度取  $400\ \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,根据法拉第定律计算得到通电时间。通电锈蚀完成后,将板件破型,取出钢筋,进行表面除锈,用电子秤称取锈蚀钢筋质量,计算其质量锈蚀率( $\eta_m$ ),有

$$\eta_m=\frac{m_0-m}{m_0}。$$

(1)

式(1)中: $m_0$  为钢筋锈蚀前的质量; $m$  为钢筋锈蚀后的质量。

1.3 锈蚀钢筋 3D 扫描

用 3D 激光扫描仪对锈蚀钢筋进行扫描,获取钢筋表面的点云数据,用后处理软件优化点云数据,去噪补缺,将数据点进行曲面重构,可得锈蚀钢筋的 3D 模型。实际锈蚀形貌与 3D 模型,如图 3 所示。

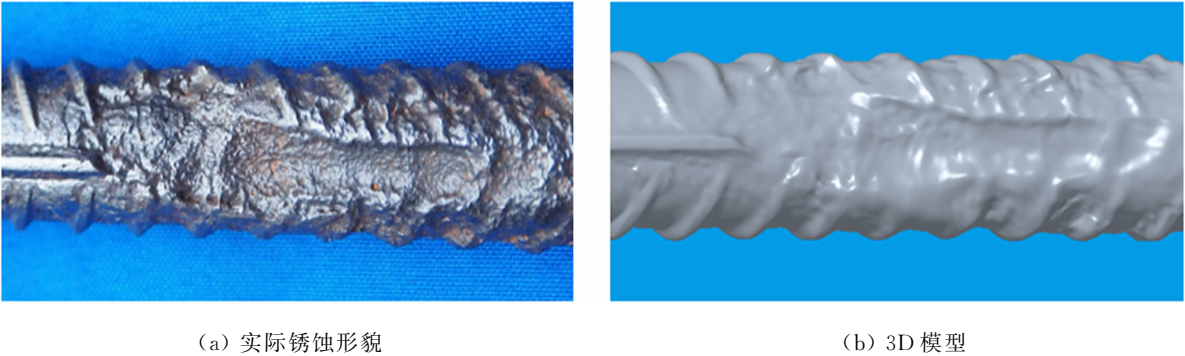


图 3 实际锈蚀形貌与 3D 模型

Fig. 3 Actual corrosion and 3D model

扫描得到的标准曲面细分语言(STL)文件包含钢筋表面点的三维坐标信息,通过 MATLAB 软件自行编制程序,获取锈蚀钢筋的锈坑深度和截面积等几何特征数据,并计算平均截面锈蚀率( $\eta_{ave}$ )和最大截面锈蚀率( $\eta_{max}$ ),有

$$\eta_{ave}=\frac{A_0-A_{ave}}{A_0},$$

(2)

$$\eta_{max}=\frac{A_0-A_{min}}{A_0}。$$

(3)

式(2),(3)中: $A_0$  为未锈蚀钢筋截面积; $A_{ave}$  为锈蚀钢筋平均截面积; $A_{min}$  为锈蚀钢筋最小截面积。

2 钢筋锈蚀分布特征

2.1 剩余截面积的纵向分布

已有的研究主要通过平均截面积或最小截面积描述钢筋的锈蚀情况,但这只能说明钢筋锈蚀的平均程度或最严重程度,无法表征锈蚀沿钢筋长度方向(纵向)的不均匀分布。对钢筋锈蚀段沿纵向每隔 1 mm 提取截面积,可得钢筋剩余截面积( $A$ )的纵向( $x$ )分布,如图 4 所示。图 4 中:试件 U1,C2,C5,C8 和 C10 的平均截面锈蚀率分别为 0%,5.55%,8.56%,19.89%和 28.38%。由图 4 可知:由于钢筋存在横肋,未锈蚀钢筋的剩余截面积沿纵向呈均匀的小幅度波动,锈蚀钢筋的剩余截面积沿纵向呈非均匀的变化,局部变化幅度较大;随着钢筋平均截面锈蚀率的增大,剩余截面积沿纵向分布的不均匀性显著增强,局部剩余截面积显著减小,平均截面锈蚀率较大的试件可见较深的波谷。

为衡量钢筋锈蚀的不均匀性,对最大截面锈蚀率与平均截面锈蚀率进行线性回归,结果如图 5 所示。由图 5 可知:最大截面锈蚀率与平均截面锈蚀率有很强的相关性;随着平均截面锈蚀率的增大,最大截面锈蚀率显著增加,局部锈损越严重,钢筋锈蚀的不均匀性显著增加。

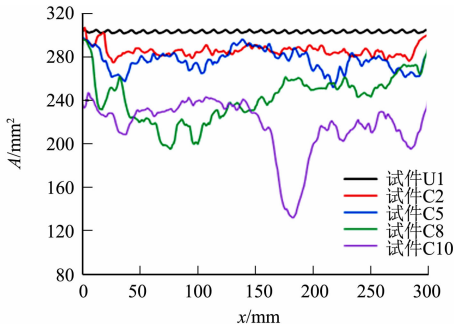


图 4 剩余截面积的纵向分布  
Fig. 4 Longitudinal distribution of residual cross-sectional area

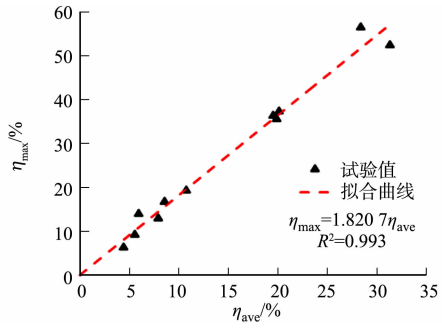
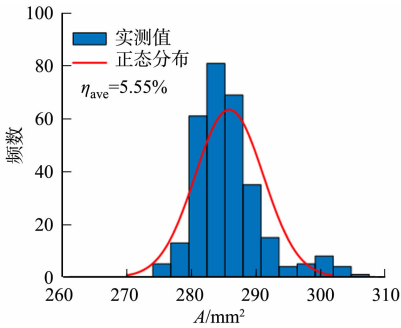


图 5 最大截面锈蚀率与平均截面锈蚀率的关系  
Fig. 5 Relationship between maximum cross-sectional corrosion rate and average cross-sectional corrosion rate

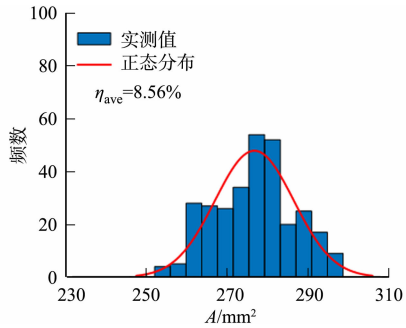
2.2 剩余截面积的分布特征

钢筋锈蚀沿纵向不均匀性体现在剩余截面积沿纵向分布的不均匀性。对 3D 扫描得到的锈蚀钢筋剩余截面积进行统计分析,可得钢筋剩余截面积的概率分布,如图 6 所示。由图 6 可知:随着平均截面锈蚀率的增加,剩余截面积总体减小且更加离散,钢筋锈蚀越不均匀;平均截面锈蚀率较低的钢筋的剩余截面积近似为单峰对称分布,随着平均截面锈蚀率的增大,剩余截面积逐渐转变为单峰左偏分布,且左尾越长,可能是由于钢筋局部锈蚀严重造成,如试件 C10。

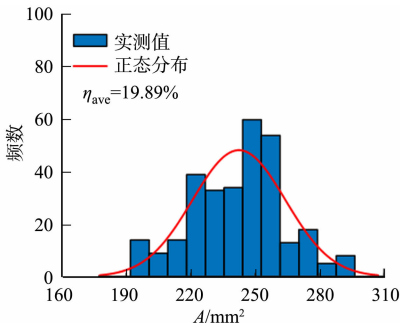
为进一步量化钢筋锈蚀的空间变异性,许多学者对锈蚀参数的概率分布模型进行研究。正态分布可用于描述钢筋剩余截面积的分布特征<sup>[14]</sup>,故对剩余截面积数据进行分布拟合(图 6)。由此可知,对于平均截面锈蚀率低于 20.00%的钢筋,正态分布拟合效果较好;当平均截面锈蚀率大于 20.00%时,剩余截面积分布近似呈偏态分布,采用韦布尔(Weibull)分布拟合效果更为准确。



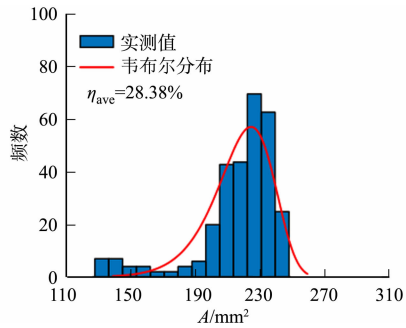
(a) 试件 C2



(b) 试件 C5



(c) 试件 C8



(d) 试件 C10

图 6 钢筋剩余截面积的概率分布

Fig. 6 Probability distribution of residual cross-sectional area of steel bars

2.3 剩余截面积概率分布模型

为了进一步量化锈蚀钢筋剩余截面积分布的随机性,根据节 2.2 得到的概率分布特征,建立剩余截面积概率分布模型。由于锈蚀率为 20.00% 以上的钢筋试件较少,会影响分布模型建立的准确性,因此,只对锈蚀率为 20.00% 以下的试件建立概率分布模型。

正态分布模型的概率密度函数为

$$f(X)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta}\cdot\exp\left[-\frac{(X-\mu)^2}{2\beta^2}\right]。$$
 (4)

式(4)中: $X$  为随机变量; $\mu,\beta$  为分布参数。

分布参数决定了概率密度函数曲线的位置和形状,因此,有必要分析分布参数与平均截面锈蚀率的相关性。对分布参数与平均截面锈蚀率做散点图并拟合,结果如图 7 所示。由图 7 可知:分布参数与平均截面锈蚀率的拟合度较高,参数  $\mu$  (均值的大小)随着平均截面锈蚀率的增大而降低,说明钢筋剩余截面积随着锈蚀程度的增大而不断减小;参数  $\beta$  (数据的离散程度)随着平均截面锈蚀率的增大而增加,即平均截面锈蚀率越大,剩余截面积越离散,钢筋锈蚀越不均匀。

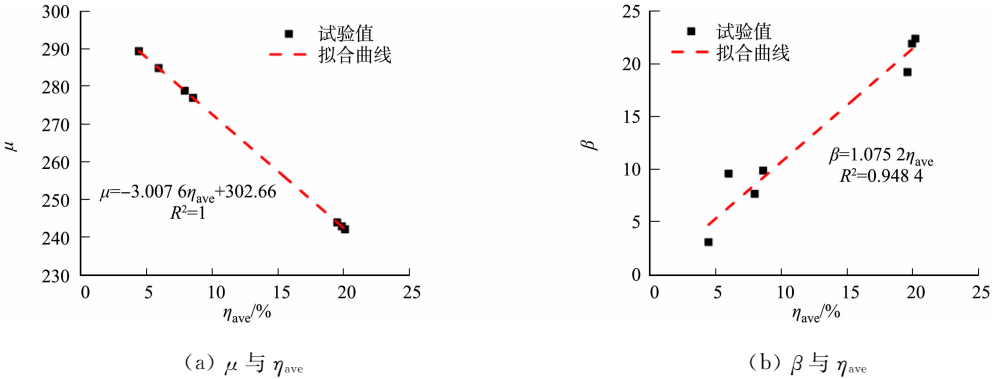


图 7 分布参数与平均截面锈蚀率的关系

Fig. 7 Relationship between distribution parameters and average cross-sectional corrosion rate  
通过线性拟合,可得分布参数与平均截面锈蚀率的关系,即

$$\mu=-3.007\ 6\eta_{ave}+302.66，$$
 (5)

$$\beta=1.075\ 2\eta_{ave}。$$
 (6)

将式(5),(6)代入式(4),可得锈蚀钢筋剩余截面积的概率分布模型。

3 锈蚀钢筋有限元分析

3.1 锈蚀钢筋拉伸模拟

为探究锈蚀对钢筋力学性能退化的影响机理,基于 3D 扫描数据,构建锈蚀钢筋 3D 实体模型,并通过 Hypermesh 软件进行网格划分,划分网格后的锈蚀钢筋有限元模型,如图 8 所示。选择网格单元大小为 1,自由划分的网格单元类型为 C3D4,并在局部锈蚀严重处进行网格加密处理,将划分好的网格模型导入 ABAQUS 软件,模拟锈蚀钢筋拉伸试验。

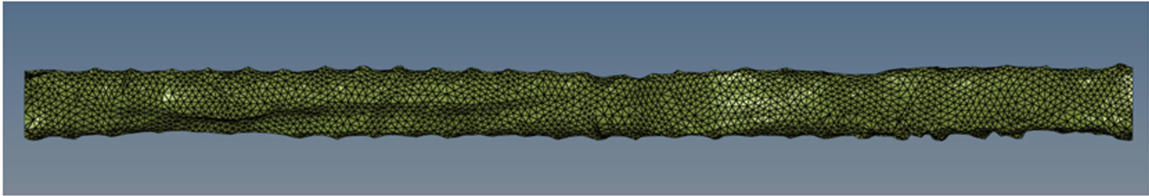


图 8 锈蚀钢筋有限元模型

Fig. 8 Finite element model of corroded steel bars

已有研究表明,锈蚀钢筋的实际力学性能未发生变化<sup>[15]</sup>。以未锈蚀钢筋拉伸试验数据计算得到的真实应力-真实应变曲线作为材料属性输入,按照试验加载情况设置加载方式和边界条件,在加载端设



置参考点,模拟完成后提取参考点的轴向位移和固定端的反作用力,可得锈蚀钢筋名义应力-名义应变( $\sigma_{nom}-\epsilon_{nom}$ )曲线,如图 9 所示。有限元分析结果,如表 1 所示。表 1 中: $f_{y,nom}$  为名义屈服强度; $f_{u,nom}$  为名义极限强度; $\delta_1$  为名义屈服强度计算值与试验值的相对误差; $\delta_2$  为名义极限强度计算值与试验值的相对误差。

由图 9 及表 1 可知:锈蚀钢筋的模拟曲线与试验曲线吻合效果良好,名义屈服强度和名义极限强度计算值与试验值的相对误差均在 3.00% 以内,说明建立的有限元模型能够较好地模拟锈蚀钢筋的力学性能。

由图 9 及相关计算可知:锈蚀钢筋的名义屈服强度和名义极限强度均随平均截面锈蚀率的增大而逐渐降低;名义极限应变随着锈蚀程度的增加而减小,与强度相比,名义极限应变的下降幅度更大,说明钢筋应变受锈蚀影响更大;随着平均截面锈蚀率的增加,屈服平台长度逐渐变短直至消失,钢筋的延性变差。

表 1 有限元分析结果  
Tab. 1 Results of finite element analysis

试件	$\eta_{ave}/\%$	$\eta_{max}/\%$	$f_{y,nom}/\text{MPa}$		$\delta_1/\%$	$f_{u,nom}/\text{MPa}$		$\delta_2/\%$
			试验值	计算值		试验值	计算值	
C2	5.55	9.18	364.92	364.48	0.12	532.58	531.38	0.23
C5	8.56	16.70	333.14	342.71	2.87	491.87	495.73	0.78
C8	19.89	35.52	264.74	271.84	2.68	372.90	381.87	2.41
C10	28.38	56.41	201.55	202.57	0.51	269.51	265.89	1.34

3.2 锈蚀钢筋真实应力分布

为了获得沿钢筋纵向的真实应力分布,在 ABAQUS 软件后处理过程中,提取锈蚀钢筋模型的节点应力,并与各节点坐标相对应,获得钢筋各截面处的真实应力。试件 C10 在屈服阶段时,锈蚀钢筋真实应力分布与剩余截面积的相关性,如图 10 所示。图 10 中: $\sigma_{true}$  为真实应力。由图 10 可知:在钢筋锈损严重处出现应力集中现象,应力峰值的大小取决于截面锈损程度,截面锈蚀越严重,应力集中效应越强;应力集中效应的影响只在钢筋的局部范围,离开截面突变处一段距离后,应力集中现象逐渐消失。

由于应力集中效应的影响,锈蚀严重处截面提前屈服,并率先达到极限强度。因此,锈蚀钢筋的屈服荷载和极限荷载均大幅度下降,钢筋的名义屈服强度和名义极限强度也随之降低。应力集中效应对锈蚀钢筋力学性能影响显著。

4 结论

1) 锈蚀钢筋截面积沿纵向分布特征可用于表征钢筋锈蚀的非均匀性。对于平均截面锈蚀率低于 20.00% 的钢筋,采用正态分布模型能够较好地量化剩余截面积分布特征;对于平均截面锈蚀率高于 20.00% 的钢筋,可以采用 Weibull 分布模型进行拟合。

2) 分布参数  $\mu, \beta$  与平均截面锈蚀率线性相关,根据拟合公式建立平均截面锈蚀率为 20.00% 以下的锈蚀钢筋剩余截面积的概率分布模型。

3) 钢筋名义屈服强度、名义极限强度及名义极限应变均随平均截面锈蚀率的增加而下降,与强度

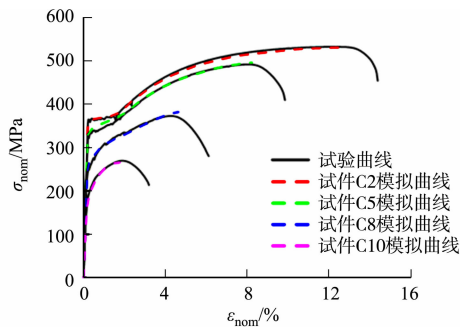


图 9 锈蚀钢筋名义应力-名义应变曲线  
Fig. 9 Nominal stress-nominal strain curves of corroded steel bars

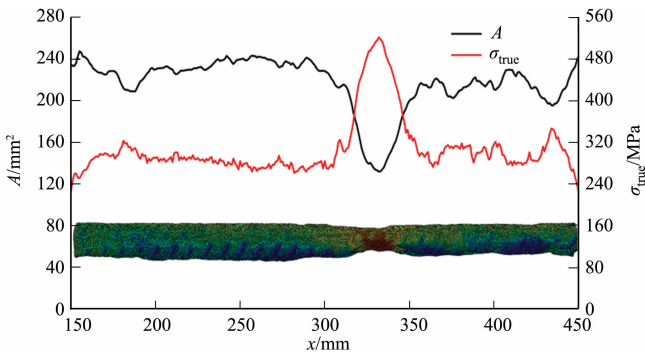


图 10 锈蚀钢筋真实应力分布与剩余截面积的相关性  
Fig. 10 Correlation between true stress distribution and residual cross-sectional area of corroded steel bars

相比,名义极限应变的下降幅度更大。截面锈损严重处出现应力集中效应,导致锈损严重处截面提前达到屈服强度,造成锈蚀钢筋力学性能退化。

参考文献:

[1] 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. DOI:10. 1016/j. corsci. 2013. 03. 037.

[2] CAPRILI S, MOERSCH J, SALVATORE W. Mechanical performance versus corrosion damage indicators for corroded steel reinforcing bars[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015(6): 1-19. DOI:10. 1155/2015/739625.

[3] 王晓刚,杜相波,闫军印,等. 混凝土构件中钢筋锈蚀的电加速技术对比试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 104-110. DOI:10. 14006/j. jzjgxb. 2015. 01. 014.

[4] LIM S, AKIYAMA M, FRANGOPOL D M. Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling[J]. Engineering Structures, 2016, 127(15): 189-205. DOI:10. 1016/j. engstruct. 2016. 08. 040.

[5] LI Chongkai, ZHANG Weiping, GU Xianglin, *et al.* Probability distribution of cross-sectional radius of corroded steel bars in concrete and its application[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 199(8): 4008. DOI:10. 1051/mateconf/201819904008.

[6] 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. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-9629. 2019. 01. 003.

[7] 付传清,何家豪,金贤玉,等. 带横向荷载裂缝钢筋混凝土梁的钢筋锈蚀形态研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 123-131. DOI:10. 14006/j. jzjgxb. 2019. 01. 014.

[8] ZHANG Weiping, CHEN Jinping, YU Qianqian, *et al.* Corrosion evolution of steel bars in RC structures based on Markov chain modeling[J]. Structural Safety, 2021, 88: 102037. DOI:10. 1016/j. strusafe. 2020. 102037.

[9] 范颖芳,周晶. 考虑蚀坑影响的锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(3): 248-252. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-9629. 2003. 03. 006.

[10] 安琳,欧阳平,郑亚明. 锈坑应力集中对钢筋力学性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(6): 940-944. DOI:10. 3321/j. issn:1001-0505. 2005. 06. 024.

[11] HOU Jian, SONG Li. Numerical investigation on stress concentration of tension steel bars with one or two corrosion pits[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015(4): 1-7. DOI:10. 1155/2015/413737.

[12] 欧阳祥森,张艳芳,邹洪波. 基于数值模拟的锈蚀钢筋力学性能退化分析[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2018, 28(2): 65-69.

[13] SUN Xiaoyan, KONG Hangting, WANG Hailong, *et al.* Evaluation of corrosion characteristics and corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars based on three-dimensional scanning[J]. Corrosion Science, 2018, 142: 284-294. DOI:10. 1016/j. corsci. 2018. 07. 030.

[14] 罗小勇,刘晋宏,聂经纶. 锈蚀钢筋截面分布特征及轴向拉伸力学性能[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5): 730-736. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-9629. 2019. 05. 009.

[15] 李亚辉,郑山锁,董立国,等. 非均匀锈蚀钢筋拉伸性能试验与模拟[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(9): 991-998. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-9629. 2022. 09. 015.

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 方德平)