



海工混凝土中严重锈蚀钢筋的 非均匀锈蚀特性与力学性能研究

杨帅^{1,2,3}, 应宗权^{1,2,3}, 李嘉民^{1,2}, 刘梅梅^{1,2,3}, 赵娟^{1,2,3}

- 中交四航工程研究院有限公司, 广东广州 510230;
- 水工构造物耐久性技术交通运输行业重点实验室, 广东广州 510230;
- 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东珠海 519082)

摘要: 以服役35年高桩码头原型构件中的锈蚀钢筋为研究对象, 采用3D扫描获得钢筋的非均匀锈蚀特征, 通过拉伸试验研究钢筋的锈蚀率对力学性能退化的影响。通过分析和回归试验数据, 建立锈蚀钢筋质量损失率与最大截面损失率关系式, 获得海工混凝土构件锈蚀钢筋名义屈服强度、名义极限强度等力学性能特征值的回归公式, 并与现有公式进行对比。结果表明, 随着钢筋锈蚀程度的增加, 锈蚀的不均匀性加剧, 相同质量损失率的钢筋所对应最大截面损失率相应增大; 同时, 钢筋的名义屈服强度、名义极限强度和极限应变等参数均发生不同程度的退化, 且屈服平台逐渐消失; 所提出的回归公式能更准确地表述海工混凝土结构中的锈蚀钢筋的力学性能的退化规律。

关键词: 非均匀锈蚀; 钢筋; 力学性能; 在役结构

中图分类号: U654

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0045-06

Non-uniform corrosion characteristics and mechanical properties of serious corroded reinforcement in marine concrete

YANG Shuai^{1,2,3}, YING Zongquan^{1,2,3}, LI Jiamin^{1,2}, LIU Meimei^{1,2,3}, ZHAO Juan^{1,2,3}

- CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
- Key Laboratory of Hydraulic Structure Durability Technology for Transportation Industry, Guangzhou 510230, China;
- Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: Taking the corroded reinforcement in member of the 35-year high pile wharf prototype as a research object, we obtain the non-uniform corrosion characteristics of reinforcement by 3D scanning, and study the effect of corrosion rate on mechanical properties degradation by tensile test. Based on the analysis and regression test data, we build a formula for calculating the relationship between the mass loss rate of corroded reinforcement and the maximum section loss rate, obtain the regression formulas for the mechanical properties of corroded reinforcement in offshore concrete members, such as nominal yield strength and nominal ultimate strength, and compare with existing formulas. The results show that with the increase of steel corrosion degree, the non-uniformity of corrosion is intensified, and the maximum section loss rate of reinforcement with the same mass loss rate increases correspondingly. At the same time, parameters such as nominal yield strength, nominal ultimate strength and ultimate strain degrade to varying degrees, and the yield platform disappears gradually. The proposed regression formula can more accurately describe the degradation law of mechanical properties of corroded reinforcement in marine concrete structures.

Keywords: non-uniform corrosion; reinforcement; mechanical property; structure in service

收稿日期: 2024-03-10

作者简介: 杨帅 (1986—), 女, 博士, 正高级工程师, 从事混凝土结构长期性能研究。

钢筋混凝土结构是港口工程中主要的受力构件，钢筋锈蚀是引起钢筋混凝土结构性能退化的主要原因。由于结构所处环境、受荷状态的差异和钢筋在混凝土构件中的位置不同以及混凝土材料自身的不均匀性，混凝土中钢筋的锈蚀也呈现出非均匀特性。受钢筋非均匀锈蚀特性的影响，锈蚀钢筋的力学性能退化存在差异性。因此，获取钢筋非均匀锈蚀形貌特征，科学认识钢筋非均匀锈蚀后的力学性能变化，对评估实际工程中钢筋混凝土结构承载力下降和退化规律具有重要意义。

对于锈蚀钢筋的力学性能，国内外学者提出了不少关于锈蚀钢筋屈服强度、极限强度和延伸率等力学性能退化模型^[1-7]。现有研究中，锈蚀钢筋的获取主要包括从实际服役构件中采集、自然裸露锈蚀和电化学加速锈蚀。吴庆等^[8]通过模拟人工气候环境和电加速锈蚀的方式获得锈蚀钢筋；徐港等^[9]采用干湿循环法获得锈蚀钢筋；Almusallam^[10]通过电化学加速腐蚀方式获得锈蚀钢筋；Apostolopoulos 等^[11]采用盐雾试验的方式获得锈蚀的钢筋，通过不同暴露时间控制不同的锈蚀率；安琳等^[12]利用电化学快速锈蚀获得锈蚀钢筋，并开展拉伸试验研究；王军强^[13]通过对大气环境锈蚀 20 多年的钢筋混凝土构件中钢筋进行拉伸试验，得出锈损钢筋的力学性能随钢筋锈蚀率的增大而下降的结论。上述研究提出的锈蚀钢筋力学性能退化模型中采用的变量主要为质量损失率，难以反映钢筋的不均匀锈蚀程度，须考虑钢筋不均匀锈蚀特性的表征，以便更为准确评价锈蚀钢筋的力学性能^[14-15]。另一方面，通电加速锈蚀的钢筋与自然锈蚀钢筋在锈蚀特征方面存在差异^[16]，难以真实反映工程现场实际的退化情况。因此，基于现场实测资料的统计分析方法对于研究在役结构的相关规律显得更为重要，所获得的结果也更符合结构实际情况。

本文以服役 35 年的滨海码头混凝土构件中锈蚀钢筋为研究对象，通过 3D 扫描获取不同锈蚀程度钢筋试件的锈蚀形貌，采用拉伸试验研究钢筋力学性能退化与其锈蚀率程度的关系，并从最大

截面损失率对荷载-位移曲线和拉伸断裂形态的影响等方面展开研究。

1 试验概况

1.1 试件取样

锈蚀钢筋试件取自某滨海码头引桥的 6 根 12 m 长空心梁板，该码头钢筋混凝土构件已服役 35 年，受海水氯离子腐蚀严重，见图 1。从空心梁板中取出 34 根不同锈蚀程度的 HRB335 钢筋试样，其中含 12 根 $\phi 20$ mm 钢筋和 22 根 $\phi 25$ mm 钢筋，截面配筋见图 2。



图 1 码头引桥空心梁板拆除现场

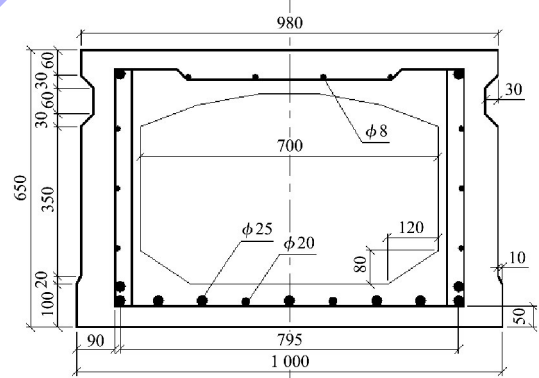


图 2 空心梁板截面配筋 (单位: mm)

1.2 锈蚀特征提取

钢筋锈蚀程度采用质量损失率 ρ_w 和最大截面损失率 $\rho_{s,max}$ 表征。 ρ_w 反映钢筋的平均锈蚀程度， $\rho_{s,max}$ 则反映钢筋局部锈蚀的情况。锈蚀钢筋经除锈处理后称其质量， ρ_w 按下式计算：

$$\rho_w = \frac{Gl - m_s}{Gl} \times 100\% \quad (1)$$

式中： G 为未锈蚀钢筋的公称质量， l 为钢筋的长度， m_s 为钢筋锈蚀后的质量。

将锈蚀钢筋试件通过激光扫描的方法, 获得其三维模型信息, 见图 3a); 以长度 1 mm 为间隔从纵向切割钢筋三维模型, 见图 3b), 获得钢筋每间隔 1 mm 的纵向截面形状和剩余截面面积。选取钢筋的最小剩余截面面积, 钢筋最大截面损失率 $\rho_{s,max}$ 按下式计算:

$$\rho_{s,max} = \frac{A_0 - A_{s,min}}{A_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: A_0 为未锈蚀钢筋的计算截面面积, $A_{s,min}$ 为钢筋锈蚀后的最小剩余截面面积。

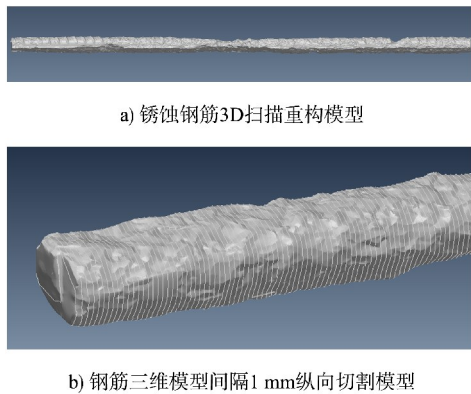


图 3 锈蚀钢筋 3D 扫描重构

1.3 加载试验

采用万能试验机开展锈蚀钢筋试件的单调拉伸试验, 采集锈蚀钢筋的荷载-位移数据, 获得锈蚀钢筋的各项力学性能指标(名义屈服强度、名义极限强度和极限应变等)。

2 钢筋损失率

2.1 质量损失率与最大截面损失率

海工混凝土结构中的不同直径锈蚀钢筋的质量损失率-最大截面损失率分布见图 4。单根钢筋的最大截面损失率均大于质量损失率, 且随着锈蚀程度的增加, 钢筋锈蚀的不均匀性和离散性更大, 加剧了质量损失率与截面损失率之间的差异。此外, 不同直径钢筋的质量损失率-最大截面损失率呈现相同的分布规律, 钢筋的直径对钢筋锈蚀的不均匀性无明显影响。

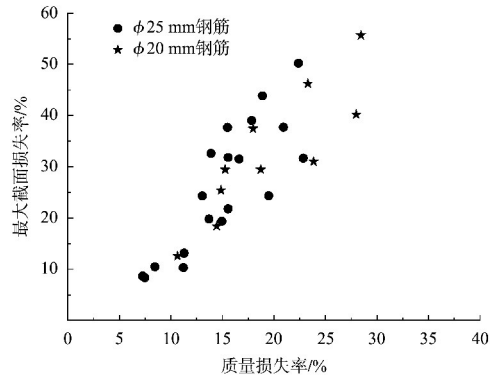


图 4 锈蚀钢筋的质量损失率-最大截面损失率分布

将质量损失率与最大截面损失率分别建立整体线性回归公式和分段线性回归公式, 为:

$$\rho_{s,max} = 1.731 6\rho_w \quad (3)$$

$$\begin{cases} \rho_{s,max} = 1.189 3\rho_w & (\rho_w < 10\%) \\ \rho_{s,max} = 2.291 0\rho_w - 11.0170\% & (\rho_w \geq 10\%) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)的分段点为钢筋质量损失率 10%, 是参考 GB/T 51355—2019《既有混凝土结构耐久性评定标准》^[17]的钢筋临界锈蚀率 10%。

整体线性回归方程和分段线性回归方程的相关系数分别为 0.844 0 和 0.848 1, 其均方误差分别为 48.68% 和 46.49%, 分段线性回归更为合适。为了验证方程的准确性和适用性, 将试验数据、本文回归方程以及文献[2]和[12]的回归方程绘于图 5。可以看出, 分段线性回归方程较能准确地描述海洋环境下混凝土结构中锈蚀钢筋质量损失率与最大截面损失率的关系, 优于文献[2](相关系数为 0.771 6)和文献[12](相关系数为 0.749 6)的回归方程。文献[2]是通过快速锈蚀方法为主获取的锈蚀钢筋, 由图 5 可知, 海洋环境下实际结构中锈蚀钢筋的锈蚀不均匀性比快速锈蚀钢筋更加显著。

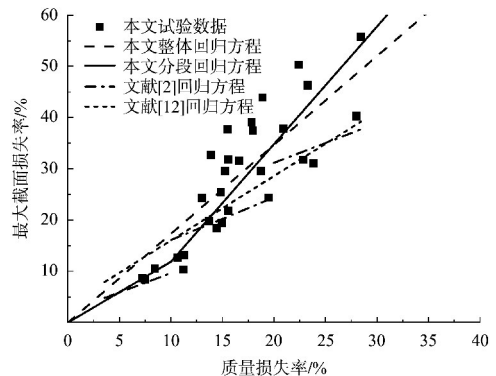


图 5 质量损失率与最大截面损失率的关系

采用分段函数描述锈蚀钢筋质量损失率与最大截面损失率的关系，计算值及其置信区间见图 6。基于质量损失率的锈蚀钢筋最大截面损失率计算模型 95% 置信区间的上、下界限表达式为：

$$\begin{cases} \rho_{s,max} = 2.322 2\rho_w & (\rho_w < 6\%) \\ \rho_{s,max} = 2.291 0\rho_w + 0.187 3\% & (\rho_w \geq 6\%) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \rho_{s,max} = 0.652 6\rho_w & (\rho_w < 14\%) \\ \rho_{s,max} = 2.291 0\rho_w - 22.937 8\% & (\rho_w \geq 14\%) \end{cases} \quad (6)$$

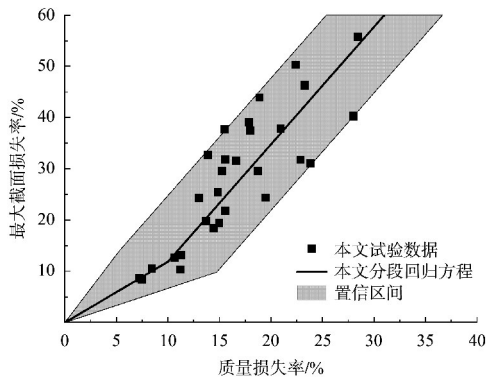


图 6 锈蚀钢筋最大截面损失率的计算公式及其置信区间

2.2 钢筋取样长度

根据所取钢筋样本段，按照不同样本段的数量随机取样和重新拼接，获得不同长度钢筋的质量损失率和最大截面损失率的关系，见图 7。可以看出，随着钢筋长度的增加(随机样本数 n 的增多)，质量损失率越来越集中，分布范围越来越小。绘制不同长度钢筋的质量损失率与最大截面损失率的斜率，见图 8。可以看出，随着钢筋长度的增加，所选取到单位长度的钢筋累计锈蚀越多、斜率越大，表明相同质量损失率的钢筋所对应最大截面损失率相应增大。

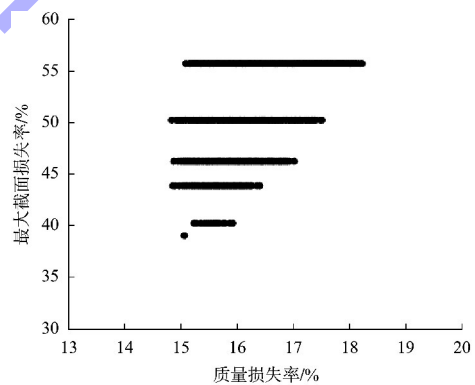
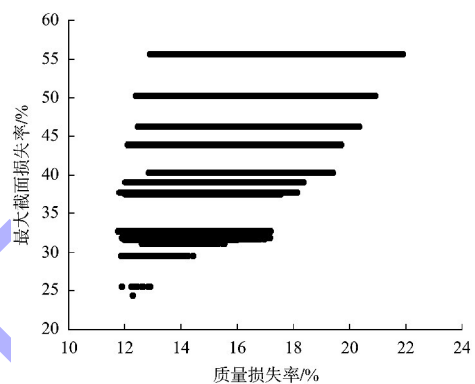
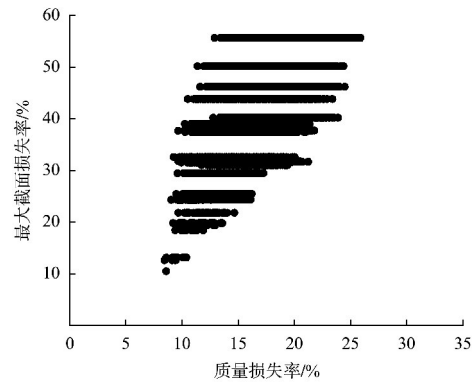
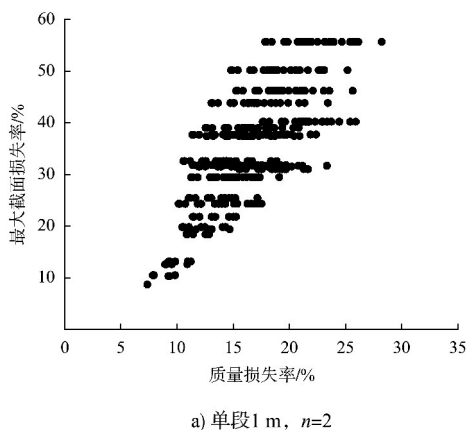


图 7 不同长度钢筋的质量损失率和最大截面损失率的关系

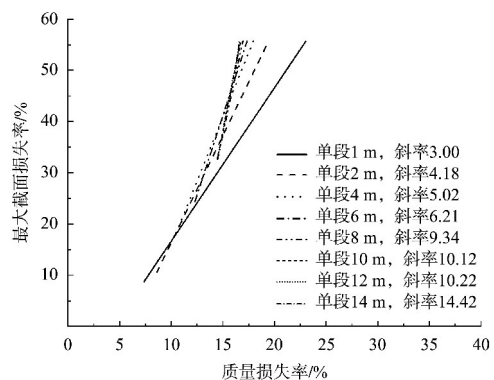
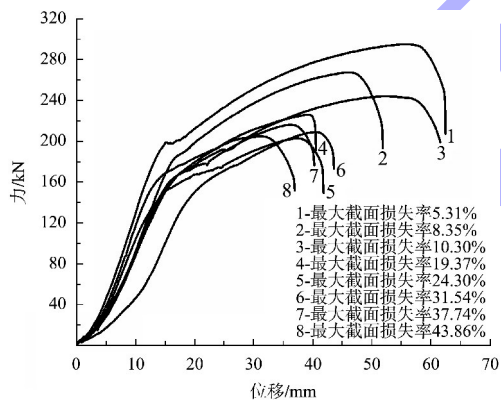


图 8 钢筋长度对质量损失率与最大截面损失率关系的影响

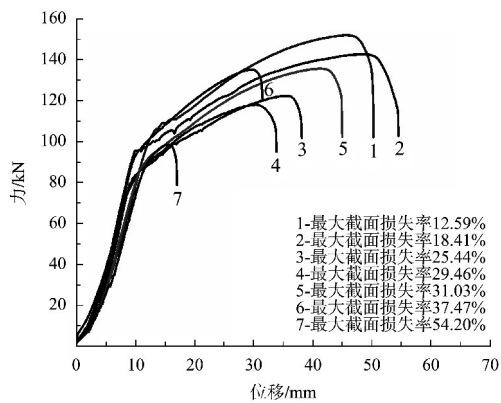
3 锈蚀钢筋强度

3.1 荷载-位移曲线

不同损失率的 $\phi 25$ mm 和 $\phi 20$ mm 钢筋的荷载-位移曲线见图 9。可以看出, 随着锈蚀程度的增加, 屈服荷载和极限荷载逐渐降低, 钢筋的极限位移也呈整体下降趋势; 相对于强度的降低幅值, 损失率对钢筋极限位移的影响更为显著。当钢筋的最大截面损失率达到 54.20% 时, 钢筋的极限位移仅 16 mm 左右, 损失率的增加严重降低了钢筋的延伸率, 这也是导致受腐蚀钢筋混凝土构件极限承载力下降的主要原因。同时, 随着最大截面损失率的增加, 荷载-位移曲线的斜率变缓, 钢筋的弹性模量随着最大截面损失率的增加有逐渐变小的趋势, 更容易产生弹性变形。对于 $\phi 25$ mm 钢筋, 当最大截面损失率为 5.31% 时, 有较为明显的屈服平台; 当最大截面损失率超过 8.35% 时, 已无明显屈服平台直至消失; 且屈服后, 钢筋的强化阶段也逐渐缩短。



a) $\phi 25$ mm 钢筋

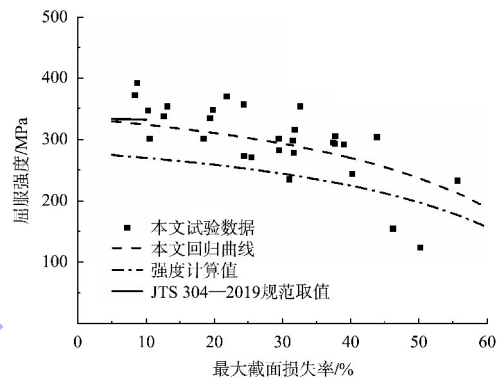


b) $\phi 20$ mm 钢筋

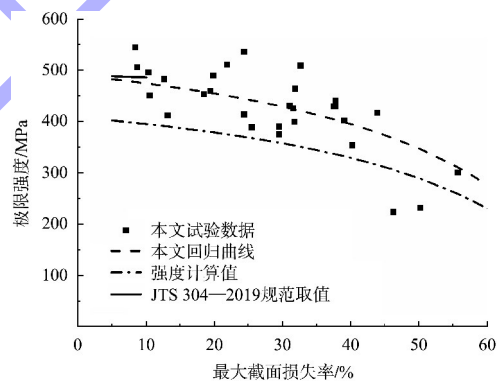
图 9 锈蚀钢筋荷载-位移曲线

3.2 锈蚀钢筋强度

将各锈蚀钢筋的最大截面损失率与其对应的名义强度(屈服强度和极限强度)的对应关系绘于图 10。可以看出, 随着锈蚀率的增加, 钢筋的名义屈服强度和名义极限抗拉强度逐渐下降, 且波动较大, 其主要原因可能是不同锈蚀率钢筋的坑蚀状况不同(如坑蚀的位置、大小和数量等)。



a) 最大截面损失率对名义屈服强度的影响曲线



b) 最大截面损失率对名义极限强度的影响曲线

图 10 最大截面损失率对名义强度的影响曲线

分别对最大截面损失率与名义屈服强度、名义极限强度的关系进行回归, 获得的回归方程见式(7)、(8), 该回归方程与试验数据的相关系数为 0.746 3。相比于 JTS 304—2019《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》^[18] 给出的锈蚀钢筋名义强度计算公式仅适用于 5%~10% 锈蚀率的钢筋, 回归公式适用于锈蚀更为严重的钢筋。针对回归公式所得锈蚀钢筋的名义强度, 考虑锈蚀钢筋强度的离散性较大, 取材料分项系数 γ_s 为 1.2, 获得锈蚀钢筋的强度计算值列于图 9。对在役构件进行承载力评估时, 锈蚀钢筋的强度计算值可按

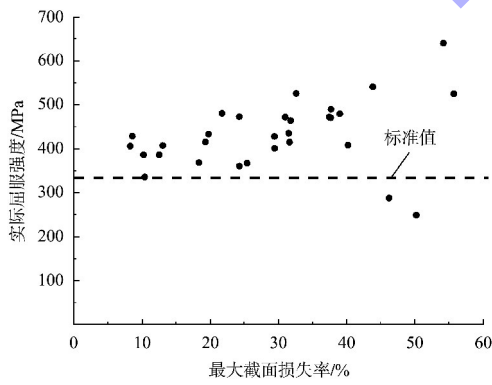
折减后的强度计算值取值。

$$\begin{cases} \sigma_{ys} = \eta\sigma_y \\ \sigma_{bs} = \eta\sigma_b \end{cases} \quad (7)$$

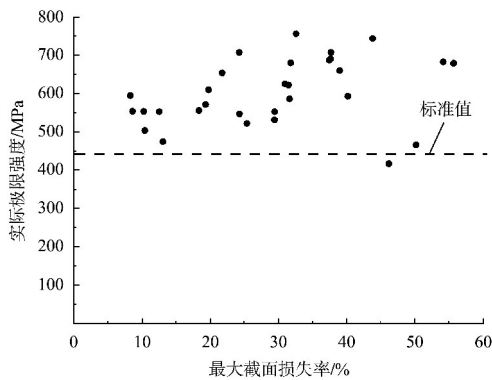
$$\eta = \frac{1 - 1.290 5\rho_{s,max}}{1 - \rho_{s,max}} \quad (8)$$

式中： σ_y 为名义屈服强度， σ_{ys} 为回归后的名义屈服强度， σ_b 为名义极限强度， σ_{bs} 为回归后的名义极限强度， η 为回归系数。

锈蚀钢筋实际强度与其锈蚀后的钢筋锈蚀形态有关，以钢筋的最大截面损失率计算锈蚀钢筋的最小剩余截面积从而获得钢筋的实际屈服强度和实际极限强度见图 11。可以看出，随着钢筋截面损失率增大，钢筋的实际强度的离散性也随之增大。除个别截面损失率大于 40% 的钢筋实际强度较小外，大部分钢筋的实际屈服强度值和实际极限强度值仍高于未锈蚀钢筋的屈服强度标准值 (335 MPa) 和极限强度标准值 (455 MPa)，锈蚀钢筋的实际强度未见明显降低。



a) 实际屈服强度



b) 实际极限强度

图 11 实际屈服强度和极限强度计算结果

4 结论

1) 质量损失率与最大截面损失率呈线性关系，随着锈蚀程度的增加，钢筋锈蚀的不均匀性和离散性更大；随着钢筋取样长度的增加，质量损失率与最大截面损失率的差异性越大。

2) 钢筋最大截面损失率超过 8.35% 后，无明显屈服平台。随着截面损失率的增大，钢筋的荷载-位移曲线中的屈服阶段和强化阶段逐渐缩短，钢筋的强度和极限位移逐渐减小，钢筋弹性模量也有减小的趋势。

3) 钢筋的名义屈服强度和名义极限强度随着损失率的增加而降低；钢筋锈蚀的不均匀性随损失率的增加而加剧，锈蚀钢筋名义强度和实际强度的离散性及波动范围随之增大，但大部分锈蚀钢筋的实际强度仍大于未锈蚀钢筋的强度标准值。

4) 对在役构件进行承载力评估时，锈蚀钢筋可取材料分项系数为 1.2，根据最大截面损失率与名义强度的关系式获得其名义强度后，锈蚀钢筋的名义强度计算值按折减后的强度计算值取值。

参考文献：

[1] 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.

[2] 惠云玲, 林志伸, 李荣. 锈蚀钢筋性能试验研究分析[J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 10-14.

[3] 王波, 袁迎曙, 李富民, 等. 氯盐锈蚀钢筋的屈服强度退化分析及其概率模型[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 597-603.

[4] 马良喆, 陈慧娟, 白常举. 钢筋锈蚀后力学性能的试验研究[J]. 施工技术, 2000, 29(12): 43-44.

[5] 蒋凤昌, 朱慈勉, 薛剑胜, 等. 锈蚀钢筋压屈名义本构关系的试验研究及应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(4): 816-821.

[6] 张伟平, 顾祥林, 金贤玉, 等. 混凝土中钢筋锈蚀机理及锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(S1): 327-332.

[7] 金伟良, 周峥栋, 毛江鸿, 等. 锈蚀钢筋在疲劳荷载作用下压磁场分布研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(5): 65-72.

[8] 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.