

文章编号: 1001-4888(2017)06-0848-11

基于分形理论的锈蚀钢筋力学性能研究^{*}

江楠^{1,2}, 张海萍^{1,2}, 刘扬^{1,2}, 姜鸿涛^{1,2}

(1. 长沙理工大学 桥梁工程湖南省高校重点实验室, 湖南长沙 410114; 2. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南长沙 410114)

摘要: 为研究钢筋锈蚀后力学性能的退化规律, 采用加速锈蚀方法获取锈蚀钢筋, 对 4 根未锈蚀钢筋试件及 20 根锈蚀钢筋试件进行了拉伸试验。试验结果表明, 在加速锈蚀条件下, 锈蚀钢筋表面轮廓具有自相似性, 可以用分形理论加以描述。锈蚀钢筋表面特征的不同对钢筋力学性能退化有一定影响, 例如, 应力—应变曲线发生明显变化, 屈服强度、极限强度降低, 屈服平台缩短直至消失。经过统计分析后, 得出了锈蚀钢筋弹性模量、屈服强度、极限强度、极限应变等力学性能的回归公式, 并在试验结果分析基础上, 建立了与锈蚀表面特征参数相关的钢筋本构关系模型。上述结果可为锈蚀钢筋混凝土结构的计算及评估提供应用参考。

关键词: 钢筋; 锈蚀; 力学性能; 分形特征

中图分类号: TH16

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-108

0 引言

钢筋锈蚀已成为影响混凝土结构耐久性的重要因素之一。因此, 了解钢筋锈蚀后其力学性能的退化规律是混凝土结构耐久性评估、寿命预测分析的基础。目前研究者针对锈蚀后钢筋的静力性能开展了相关试验。吴庆等^[1]通过回归试验数据, 建立了与锈蚀率相关的钢筋本构关系模型。Almusallam^[2]通过钢筋的轴向拉伸试验, 研究了锈蚀钢筋极限强度随锈蚀损伤的变化关系。张伟平等^[3,4]通过拉伸试验研究了锈蚀钢筋弹性模量、极限应变等力学性能的退化规律, 建立了锈蚀钢筋的应力—应变关系模型。徐港等^[5]研究发现, 锈蚀钢筋屈服平台随锈蚀率的增大逐渐缩短甚至消失, 断裂形态与局部锈蚀特征相关。

尽管目前在锈蚀钢筋静力性能研究方面取得了一些成果, 但在描述钢筋锈蚀程度时, 大多数学者采用锈蚀率作为衡量锈蚀损伤的参数。由于混凝土材料的不均匀性, 坑蚀的出现具有较大的随机性, 以往的研究表明, 破坏处往往发生于锈坑处, 而锈蚀率未能包含锈坑深度等相关信息, 最终导致试验结果离散性较大。

上述试验研究均假设钢筋锈蚀为一特定形态, 即均匀锈蚀形态, 但实际桥梁结构中影响钢筋锈蚀的因素复杂且多变, 因此实现锈蚀钢筋表面形态的准确表征, 将有助于减小简单等效后的影响。分形理论为解决该问题提供了有效手段, 近年来在一些领域得到了应用。Gao 等^[6]对混凝土裂纹进行了分形分析, 讨论了裂纹分形维数对混凝土结构失效模式的影响。郭伟等^[7]评述了混凝土空隙的分形特征、混凝土断裂韧性和断裂能的分形效应及分形理论在混凝土材料声发射中的应用。曹茂森等^[8]应用分形理论来描述钢筋混凝土结构表面裂缝分布。目前对钢筋锈蚀后表面轮廓的表征尚无较为准确的模型, 结合实测数据和分形分析对钢筋表面轮廓进行描述是一种较好的方法。外加电流加速锈蚀是目前用于模拟

^{*} 收稿日期: 2017-05-04; 修回日期: 2017-08-05

基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划)(2015cb057704); 国家自然科学基金资助项目(51378081)

通讯作者: 刘扬(1973—), 男, 教授, 博士。主要研究领域: 桥梁结构可靠度理论与安全评估。

混凝土中钢筋锈蚀的主要手段。基于此,本文作者使用万能数字控制试验机对锈蚀钢筋试件进行拉伸试验。利用试验结果分析钢筋锈蚀后屈服强度、极限强度的退化规律,采用分形分析的方法,建立了考虑表面不均匀性的锈蚀钢筋本构方程,对于锈蚀钢筋剩余寿命的研究具有现实意义。

1 分形理论

分形理论的研究对象为自然界的非线性系统中出现的不光滑和不规则形体,它直接从非线性系统本身出发,通过研究对象本身的规律性,可以将以往不能定量描述或难以定量描述的对象用一种简便的方法表述出来。

在分形理论中,分形维数是定量表示自相似程度的最基本量。例如,科赫曲线的分形维数为 1.26,而皮亚诺曲线的分形维数为 2。分形维数类型主要分为: Hausdorff 维数、Lyapunov 维数、信息维数、计盒维数等。计盒维数是一种被广泛应用的分形维数,其他很多维数的概念都是计盒维数演变而来,由于其易进行程序化计算,因此本文采用计盒维数的方法来描述锈蚀钢筋的表面轮廓特征。

设 $A \in H(R^m)$, 其中 R^m 是欧式空间,用边长 r 为 $1/2^n$ 的封闭正方形盒子覆盖 A ,通过改变盒子的边长,可以得到不同尺寸盒子覆盖该区域的数目 $N(r)$,若该区域具有分形特性,则 $\ln(r)$ 与 $\ln(N(r))$ 存在线性关系,求解计盒维数的具体步骤如图 1 所示。

$$D = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln N(A)}{\ln 2^n}$$

(1)

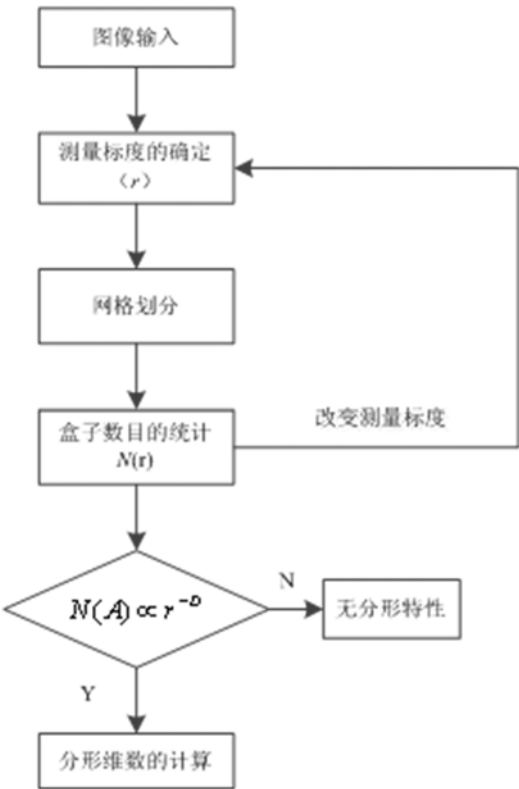


图 1 盒维数计算流程
Fig. 1 Flowchart of box-counting

2 试验设计

2.1 试验概况

试件采用 700mm×400mm×82mm 的混凝土板,通过控制通电时长获得不同锈蚀程度的钢筋试件。混凝土板的设计强度等级为 C30;配合比为水泥:水:砂:石=1:0.43:1.32:2.91。在每块混凝土板中均匀布置 6 根直径为 18mm 的带肋钢筋,钢筋采用 HRB400,保护层厚度为 30mm,钢筋端部

用环氧树脂包裹,并用 PVC 套筒密封,避免其发生锈蚀。钢筋表面特征如图 2 所示,钢筋力学性能如表 1 所示,钢筋的化学成分如表 2 所示。实测锈蚀前钢筋的屈服强度及极限强度平均值分别为 482.8MPa、607.4MPa,极限延伸率的平均值为 24.3%;实测锈前钢筋的线密度为 1.901kg/m。

为了加快钢筋的锈蚀进程,采用外加直流电的方法加速钢筋锈蚀。将受拉钢筋作为阳极接入直流电路,不锈钢片作为阴极,连同介质为 NaCl 溶液,通电后形成闭合回路。电源采用直流稳压电源,最大输出电压为 20V,最大输出电流为 1.2A。根据法拉第定律,通过计算钢筋的理论锈蚀量来估算钢筋的通电时长和钢筋的锈蚀程度。

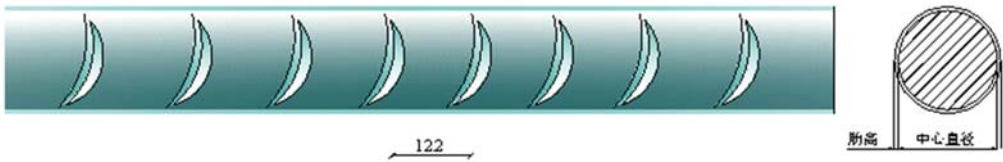


图 2 带肋钢筋表面特征(单位:mm)
Fig. 2 Surface characteristic of steel bar(unit: mm)

表 1 钢筋参数及力学性能
Tab. 1 Parameter and mechanical properties of steel bar

钢筋参数	钢筋直径 (mm)	肋高 (mm)	肋间距 (mm)	肋倾角 (度)	生长率 (%)	屈服强度 (MPa)	极限强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	泊松比
变形钢筋	18	2.5	12.2	57.2	30	483.1	607.2	210	0.3

表 2 钢筋的化学成分
Tab. 2 Chemical composition of steel bar

钢筋类型	锰	硅	碳	硫	磷
变形钢筋	1.36	0.52	0.25	0.045	0.042

试件分为五组(每组五根试件),第一组为参考组,该组通电时长为 0h;第二组通电快速锈蚀时长为 6h;第三组通电时间 12h;第四组通电锈蚀时长为 15h;第五组通电锈蚀时长为 20h。各组试件明细见表 3。

表 3 试件明细表
Tab. 3 Details of test specimens

试件编号	通电时间(h)	备注
R	0	参考试件
CS1	6	锈蚀试件
CS2	12	锈蚀试件
CS3	15	锈蚀试件
CS4	20	锈蚀试件



图 3 钢筋的快速锈蚀装置
Fig. 3 Experimental setup of accelerated corrosion test

2.2 钢筋加速锈蚀及锈蚀率的测定

试验采用外加电流实现钢筋的加速锈蚀,钢筋的设计锈蚀率为 4%、6%、8%、10%四个等级,根据 Faraday 法则预估锈蚀通电时间。图 3 为钢筋的加速锈蚀试验现场。当钢筋锈蚀率达到预期值,停止通电,破除混凝土,用质量分数为 12%的盐酸溶液清洗钢筋表面的锈蚀产物及混凝土,然后用清水漂洗钢筋,最后将钢筋放入干燥器中烘干,用电子天平测量每根试件的质量。

采购钢筋时,用切割机截取若干段等长度钢筋,并用电刷对所有钢筋进行除锈处理,然后用游标卡尺精确测量出钢筋的长度,并用电子秤测量其质量,最后求得钢筋的单位长度质量(g/mm)。

当钢筋锈蚀率达到预期值,停止通电,破除混凝土,用质量分数为 12%的盐酸溶液清洗钢筋表面的锈蚀产物及混凝土,然后用清水漂洗钢筋,最后将钢筋放入干燥器中烘干,用电子天平测量每根试件锈蚀后的质量,精确至 0.01g。根据锈蚀前后钢筋的质量损失计算钢筋的实际锈蚀率,锈蚀率可由式(2)进行计算:

$$\rho = \frac{m_0 - m_c}{m_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中, m_0 为锈蚀前钢筋的质量; m_c 为锈蚀后钢筋的质量; ρ 为钢筋的实际锈蚀率。锈蚀率实测结果见表 4,由表可以看出,钢筋锈蚀率在 3%~11%之间,达到了预期的锈蚀效果。

表 4 试件锈蚀率

Tab. 4 Corrosion rate of steel bar

试件编号	锈蚀率(%)	最大锈坑深度(mm)	平均锈坑深度(mm)
CS4-1	4.81	3.52	1.38
CS4-2	4.36	2.98	1.12
CS4-3	4.13	2.79	1.92
CS4-4	3.91	2.52	0.96
CS4-5	4.55	2.88	2.12
CS6-1	6.06	3.75	2.33
CS6-2	6.67	3.66	2.56
CS6-3	6.48	3.34	1.23
CS6-4	6.1	3.55	2.67
CS6-5	6.43	3.12	1.34
CS8-1	7.35	4.32	3.23
CS8-2	8.82	3.87	1.56
CS8-3	8.51	4.18	1.73
CS8-4	8.49	4.04	2.37
CS8-5	8.51	3.59	1.27
CS10-1	11.16	4.52	3.01
CS10-2	10.03	4.04	2.53
CS10-3	9.99	3.84	2.45
CS10-4	9.9	3.92	1.95
CS10-5	9.61	3.73	1.45

2.3 静力拉伸试验

锈蚀钢筋的轴向拉伸试验在万能试验机及 MTS 材料试验机上进行,试验装置如图 4 所示。试验前,根据实测锈蚀率将锈蚀钢筋分为 5 组,即为 R、C1、C2、C3、C4,对应锈蚀率分别为 0、4%、6%、8%、10%,每组有 4~5 根钢筋。首先对未锈蚀钢筋进行静力拉伸试验,得到其弹性模量、极限强度、屈服强度、极限延伸率等力学性能参数。在钢筋快速锈蚀试验后,将试件置于 MTS 试验机上进行拉伸试验,施加荷载为 20%未锈蚀钢筋的屈服强度,测量不同锈蚀程度钢筋的弹性模量。然后用万能试验机进行试件的极限拉伸试验,得到不同锈蚀程度钢筋的极限强度及屈服强度。

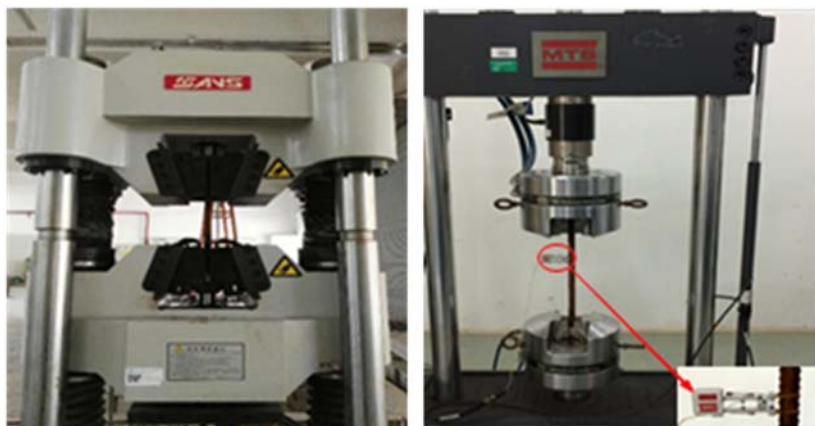


图 4 试验装置图

Fig. 4 Tensile test setup

3 试验结果分析

3.1 锈蚀钢筋表面轮廓的表征

钢筋烘干后用三维激光扫描仪对锈蚀钢筋表面进行扫描,并运用与扫描仪配套软件建立钢筋的实体模型,将扫描所得的实体模型图像输入程序,并将其转化为数据形式,进而实现图像到数据的转化。在得到含有锈蚀钢筋表面轮廓的二值图像后,提取锈蚀钢筋纵向表面轮廓线,应用分形维数的网格覆盖法计算出数据点系列,最后经过最小二乘拟合得到分形维数值。由于篇幅有限,只给出一根锈蚀钢筋实体模型图片及表面轮廓曲线,如图 5 所示。

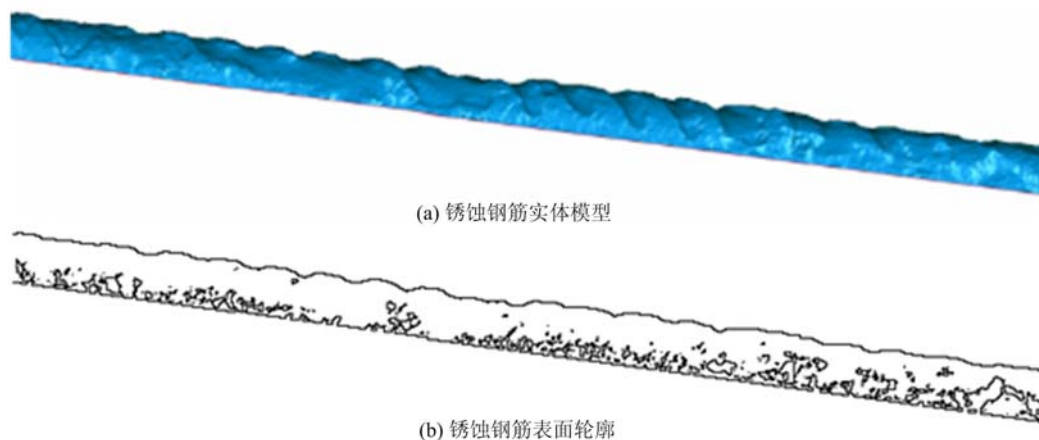


图 5 锈蚀钢筋实体模型及表面轮廓提取

Fig. 5 The model of corroded steel bar and its surface profile

对锈蚀钢筋表面轮廓进行分形维数的计算,计算结果如图 6 所示。由图 6 可知, $\ln(N)$ 与 $\ln(r)$ 线性相关,说明锈蚀率后钢筋表面轮廓具有自相似性,即可用分形理论对其表面形态进行表征。

对于具有分形特征的表面轮廓,可以使用分形维数 D 及尺度系数 C 来表征,其表达式为:

$$N(r) = Cr^{-D} \quad (3)$$

式中, r 为测量盒子的边长。

将其对数化后可得:

$$\ln[N(r)] = -D\ln(r) + \ln(C) \quad (4)$$

由式(4)可知,若 $\ln(N)$ 与 $\ln(r)$ 线性相关时,直线的斜率为轮廓的分形维数,直线的截距表示测量轮廓的尺度系数。图 7(a)分别绘制了两根锈蚀钢筋表面轮廓曲线,从图中可以看出,两根锈蚀钢筋的表面粗糙程度相似,表现在双对数图中即为截距相近,这与文献[9]的研究是一致的。尺度系数反映了

表面轮廓测度的大小,属于表面轮廓测度的绝对测量参数,其数值的增大或减小,反映了表面平整性的好坏,即表面粗糙程度的变化。图7(b)所示为同一锈蚀钢筋的表面轮廓曲线,其中红色曲线为蓝色曲线的幅值放大两倍后所得到的轮廓曲线,对两条曲线进行分形分析后发现,两条曲线的斜率相同,但截距不同,这表明分形维数 D 反映的是轮廓曲线的复杂程度和不规则性,它是表面轮廓测度相似性的测量参数,其数值的增大或减小,反映了表面轮廓测度的差异程度,即表面轮廓曲线相似性的强弱。

由此可知,无论是分形维数还是尺度系数都无法独立表征锈蚀钢筋的表面轮廓特征,因此将分形参数与尺度系数相结合,令式(4)中 $N(r) = 1$,对式(3)进行相应变换可得:

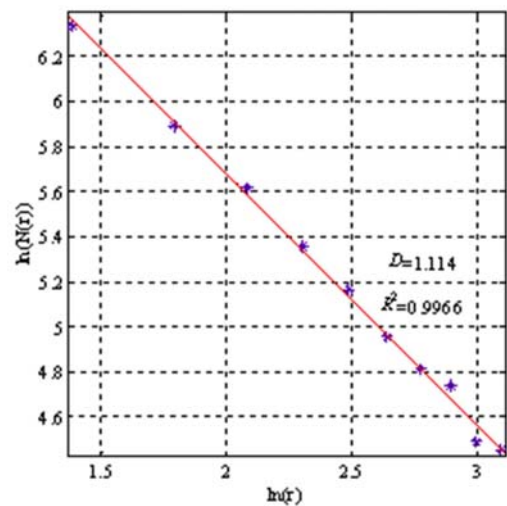


图6 分形维数计算

Fig. 6 Fractal calculation

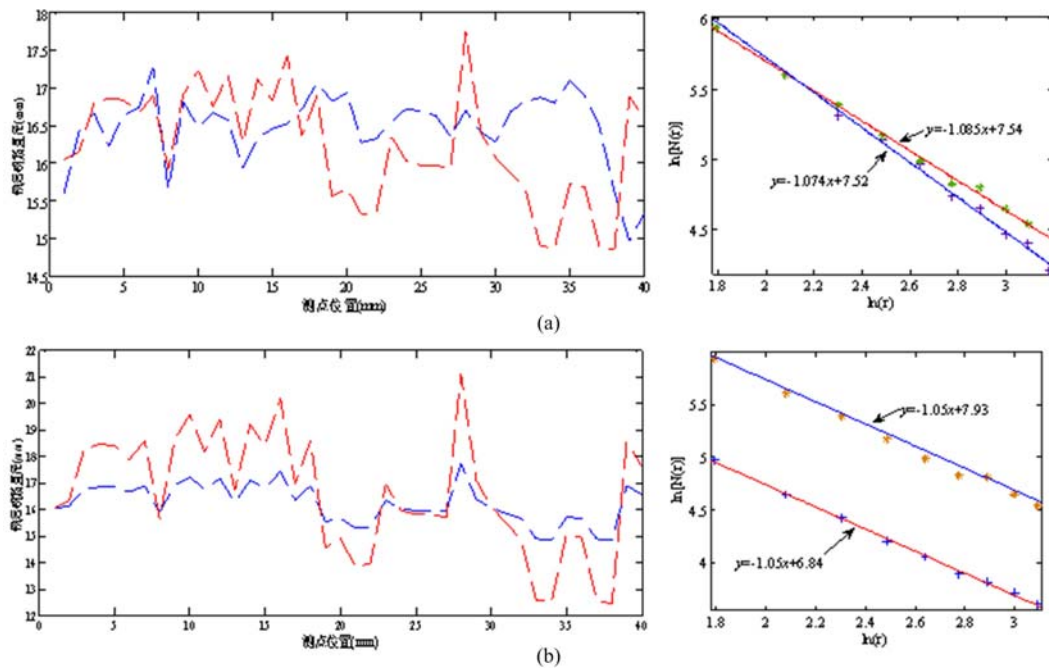


图7 锈蚀钢筋表面轮廓及其分形维数

Fig. 7 The surface profile of corroded and its fractal dimension

$$r^* = C^{-D} \quad (5)$$

令 r^* 为表面特征参数,其把分形维数 D 和尺度系数 C 对表面粗糙度的表征效果进行了叠加,因此 r^* 可以更准确地反映锈蚀钢筋表面粗糙程度的变化。

3.2 锈蚀率与表面轮廓特征参数的关系

以往的研究^[10-12]通过锈蚀率来衡量钢筋的锈蚀程度,然而锈蚀率所表示的是锈蚀损伤的平均概念,即使在锈蚀率相同或截面损失率相同的情况下,由于钢筋表面锈坑深度不同,则锈坑位置处的锈蚀损伤也不尽相同,因此,钢筋表面轮廓的不均匀性将会对锈蚀钢筋的力学性能产生较大的影响。

图8所示为锈蚀表面特征参数与锈蚀率的关系,随着锈蚀率的增加,表面特征参数有上升趋势,由此说明随着锈蚀率的增大,锈蚀钢筋表面的非均匀程度增加。进一步观察可以发现,在相同锈蚀率下,表面特征参数的波动较大,由此可见,即使在锈蚀率一定时,钢筋表面的锈蚀形态也各不相同,即蚀坑的

大小、深度及分布各异。

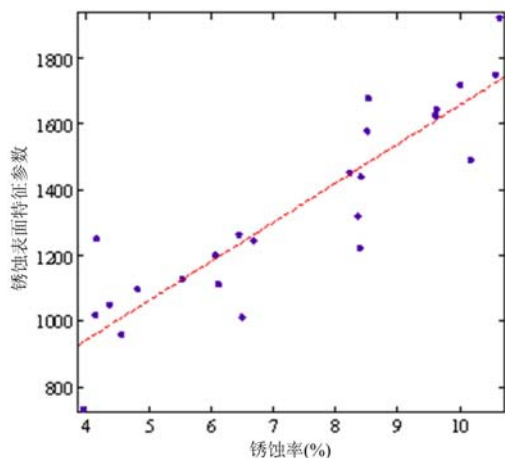


图 8 钢筋表面轮廓特征参数与锈蚀率的关系

Fig. 8 Surface profile parameter vs. corrosion rate

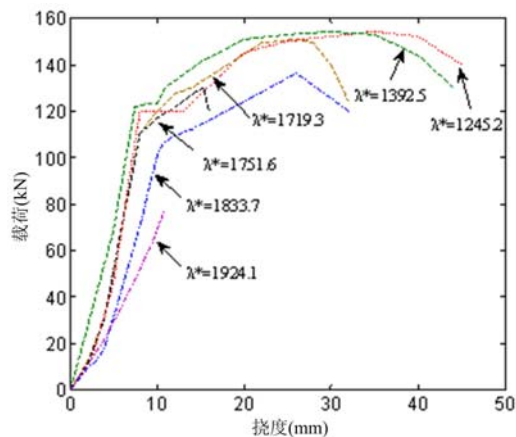


图 9 锈蚀钢筋荷载—变形曲线

Fig. 9 Load-deformation curves for corroded steel bars

3.3 锈蚀钢筋荷载—变形曲线

图 9 所示为不同锈蚀程度钢筋荷载—变形全过程曲线。结果表明:随着表面非均匀程度的增加,钢筋的极限变形显著减小,钢筋的后期变形能力下降,屈服平台逐渐减小,在表面特征参数达到 1719.3 时,屈服平台基本消失,钢筋表现为脆性破坏;进一步观察图 9 可以发现,锈蚀钢筋的弹性模量也呈现下降趋势。其原因为非均匀锈蚀对钢筋应力的影响比对应变的影响更为显著,因此宏观表现为弹性模量的减小。

3.4 非均匀锈蚀对力学性能的影响

已有研究一般采用锈后平均截面积来衡量锈蚀钢筋的力学性能,而轴向拉伸过程中破坏面往往发生在锈蚀损伤较为严重的薄弱截面。图 10 所示为屈服强度、极限强度与锈蚀表面特征参数及锈蚀率的关系。从图中可以看出,屈服强度和极限强度与锈蚀轮廓特征参数 r^* 均近似线性关系,屈服强度与极限强度均随 r^* 的增大呈下降趋势,这与采用锈蚀率作为衡量锈蚀损伤参数所得到的结论是一致的。进一步观察图 10 可以发现,锈蚀率与屈服强度、极限强度的离散程度较锈蚀表面特征参数更高,这是因为锈蚀率反映的是锈蚀钢筋质量的减少量,以往的研究为简化计算,默认腐蚀形态为均匀锈蚀,因此在表征锈蚀程度时未考虑应力集中的影响。

3.5 弹性模量及极限应变

使用三维激光扫描仪可以获取试件断口处截面的实际面积。定义锈蚀钢筋弹性模量退化系数 α 为锈蚀钢筋弹性模量与未锈蚀钢筋弹性模量平均值之比。统计分析后得到 $\alpha-r^*$ 的关系曲线,如图 11(a) 所示。由图可以看出,随着锈蚀钢筋表面粗糙程度的增大,锈蚀钢筋的弹性模量呈下降趋势,且其在一定范围内波动,但波动范围较小。

定义锈蚀钢筋极限应变相对值为锈蚀钢筋极限应变与未锈蚀钢筋极限应变之比。由锈蚀钢筋荷载—位移曲线可以看出,在表面特征参数小于 1850 时,锈蚀钢筋的本构曲线仍呈现弹性特征,因此选取 1850 作为临界值,当表面特征参数超过 1850 后,其极限应变可通过极限强度与弹性模量之比获得。由锈蚀钢筋在标距范围内的本构曲线,可得到锈蚀钢筋的极限应变及屈服应变,图 11(b) 给出了 $\gamma-r^*$ 的统计曲线。由图 11(b) 可以看出, γ 随特征参数的增长近似线性下降。

3.6 锈蚀钢筋力学性能与表面特征参数间的定量关系

由于锈蚀钢筋的实际强度与其锈蚀后的直径及坑蚀形态有关,从而导致实际强度与钢筋锈蚀率之间的关系离散性较大。根据试验值的趋势,确定回归模型,然后用最小二乘法的原理求得参数的估计值,最后根据参数估计值确定回归曲线方程,从而得到锈蚀钢筋屈服强度、极限强度与锈蚀表面参数之

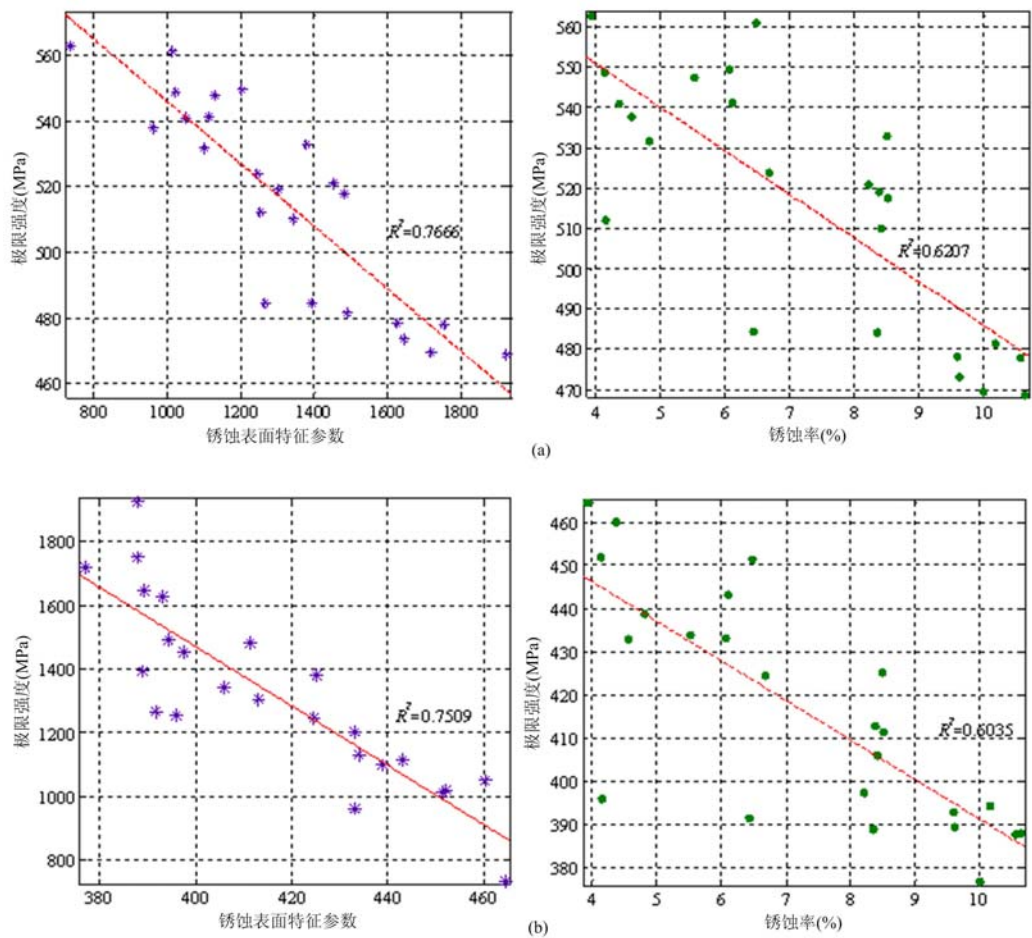


图 10 锈蚀钢筋力学性能与表面特征参数及锈蚀率关系

Fig. 10 Mechanical properties vs. surface profile parameter and corrosion rate

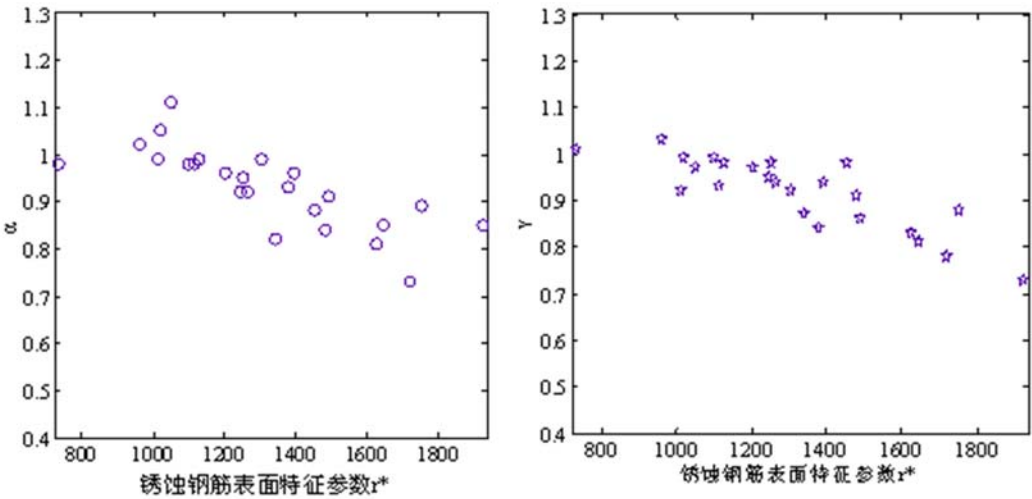


图 11 α, γ 与 r^* 的关系

Fig. 11 Relationship between α, γ and r^*

间的定量关系模型。

通过对试验结果分析发现,当锈蚀表面参数大于 1850,锈蚀钢筋的屈服强度、极限强度下降速度增大,故将作为模型的界限。

当 $\lambda^* < 1850$ 时,

$$f_{y,c} = f_{y,0}(1.1299 - 0.103\lambda^*) \quad (6)$$

$$f_{u,c} = f_{u,0}(1.028 - 0.065\lambda^*) \quad (7)$$

$$\epsilon_{s,c} = \epsilon_{s,0}(1.016 - 0.053\lambda^*) \quad (8)$$

$$E_{s,c} = E_{s,0}(1 - 0.903\lambda^*) \quad (9)$$

当 $\lambda^* > 1850$ 时,

$$f_{y,c} = f_{y,0}(0.84 - 0.011\lambda^*) \quad (10)$$

$$f_{u,c} = f_{u,0}(0.85 - 0.021\lambda^*) \quad (11)$$

$$\epsilon_{s,c} = \epsilon_{s,0}(0.82 - 0.017\lambda^*) \quad (12)$$

$$E_{s,c} = E_{s,0}(1 - 1.23\lambda^*) \quad (13)$$

式中, $f_{y,c}$, $f_{u,c}$, $\epsilon_{s,c}$, $E_{s,c}$ 分别为锈蚀后钢筋的屈服强度、极限强度、极限应变、弹性模量; $f_{y,0}$, $f_{u,0}$, $\epsilon_{s,0}$, $E_{s,0}$ 分别为未锈蚀钢筋的屈服强度、极限强度、极限应变、弹性模量。

3.7 锈蚀钢筋本构关系模型

国内外学者提出了多种钢筋本构关系模型^[13,14],但这些模型待定参数较多,模型复杂不利于应用在工程实践中。本文采用过原点、屈服强度及极限强度的二折线本构关系模型,该模型只需确定弹性模量、屈服强度及极限强度即可。

当 $\lambda^* < 1850$ 时:

$$\sigma = \begin{cases} \epsilon E_{s,c}, & (\epsilon \leq \epsilon_0) \\ f_{y,c} + (\epsilon - \epsilon_0) \left[\frac{f_{u,c} - f_{y,c}}{\epsilon_{s,c} - \epsilon_0} \right], & (\epsilon \geq \epsilon_0) \end{cases} \quad (14)$$

当 $\lambda^* > 1850$ 时:

$$\sigma = \epsilon E_{s,c} \quad (15)$$

式中, σ , ϵ 分别为锈蚀钢筋应力及应变; ϵ_0 为弹性阶段最大应变; $\epsilon_{s,c}$ 为锈蚀钢筋极限应变。

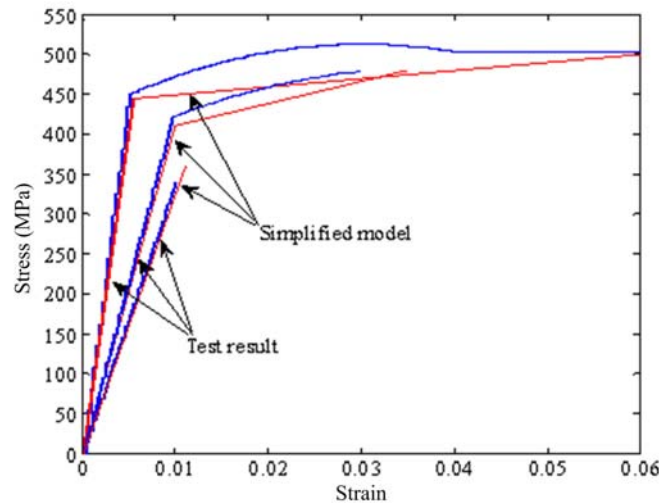


图 12 锈蚀钢筋本构关系模型与试验曲线的比较

Fig. 12 Comparison between theoretic and testing stress-strain curves for corroded steel bar

针对上述本构关系模型,将不同锈蚀程度钢筋参数代入该模型中绘制出锈蚀钢筋的应力—应变曲线,因篇幅有限,仅给出了部分计算对比图,如图 12 所示。

上述分析计算结果检验了所提出模型的可靠性,证明了本文提出的锈蚀钢筋本构关系模型具有一定的适用性,可为锈蚀钢筋混凝土桥梁结构的计算与评估提供借鉴。

4 结论

通过对加速锈蚀环境下的锈蚀钢筋混凝土板破坏所得的24根锈蚀钢筋进行拉伸试验,得出了以下结论:

- (1) 在氯盐加速锈蚀环境下,锈蚀钢筋表面轮廓线存在无标度区,其表面具有分形统计特征。
- (2) 不同锈蚀程度钢筋试件的表面特征参数随锈蚀率的增加呈上升趋势,但在固定锈蚀率范围内,锈蚀表面特征参数的波动较大。
- (3) 随着锈蚀的发展,钢筋从塑性破坏向弹性破坏转变,且屈服强度、极限强度等力学性能参数均与锈蚀表面特征参数呈线性关系,且随表面特征参数的增加呈下降趋势。
- (4) 根据试验结果,得到了锈蚀钢筋屈服强度、极限强度、弹性模量与锈蚀表面特征参数的定量关系模型,为简化计算模型,建立了锈蚀钢筋的双直线本构关系模型,可用于锈蚀钢筋混凝土桥梁的计算与评估。

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 Qing, YUAN Yingshu. 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] Almusallam A A. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars[J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(8): 361—368.
- [3] 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 Weiping, SHANG Dengfeng, GU Xianglin. Stress-strain relationship of corroded steel bars[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(5): 586—592 (in Chinese))
- [4] 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 Weiping, LI Chongkai, GU Xianglin, et al. Stochastic model of constitutive relationship for corroded steel bars [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 920—926 (in Chinese))
- [5] 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 Gang, ZHANG Dong, LIU Defu, 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))
- [6] GAO Ma, HUI Li, Asce M. Repair effects and acoustic emission technique-based on fracture evaluation for predamaged concrete columns confined with fiber-reinforced polymers[J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(6): 626—639.
- [7] 郭伟, 秦鸿根, 陈惠苏, 等. 分形理论及其在混凝土材料研究中的应用[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(7): 1362—1368 (GUO Wei, QIN Honggen, CHEN Huisu, et al. Fractal theory and its applications in the study of concrete materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(7): 1362—1368 (in Chinese))
- [8] 曹茂森, 任青文. 钢筋混凝土结构损伤检测的分形特征因子[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 59—64 (CAO Maosen, REN Qingwen. Damage detection of reinforced concrete structures based on fractal characteristic factor [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(12): 59—64 (in Chinese))
- [9] Zhu H, Ge S. Experimental study on the characterization of worn surface topography with characteristic roughness parameter[J]. Wear, 2003, 255(6): 309—314.
- [10] 刘扬, 江楠, 邓扬. 持续荷载与氯离子共同作用下 RC 梁抗弯试验研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(10): 65—70 (LIU Yang, JIANG Nan, DENG Yang. Study on flexural experiment of reinforced concrete beams under sustained overloading and corrosion[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(10): 65—70 (in Chinese))
- [11] Yingang Du, Martin Cullen. Structural performance of RC beams under simultaneous loading and reinforcement corrosion[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 472—481.
- [12] Malumbela G, Alexander M, Moyo P. Variation of steel loss and its effect on the ultimate flexural capacity of RC beams corroded and repaired under load[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 1051—1059.

- [13] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京:清华大学出版社, 1999 (GUO Zhenhai. Principle of reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999 (in Chinese))
- [14] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M]. 上海:同济大学出版社, 2004 (GU Xianglin. Basic principle of concrete structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2004 (in Chinese))

Experimental Study on Mechanical Properties of Corroded Steel Bar Based on Fractal Theory

JIANG Nan^{1,2}, ZHANG Hai-ping^{1,2}, LIU Yang^{1,2}, JIANG Hong-tao^{1,2}

(1. Hunan Province University Key Laboratory of Bridge Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Civil & Architecture Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical property deterioration of corroded steel bar, accelerated corrosion method was used to obtain corroded steel bars. Tensile experiment was carried out respectively for 4 specimens without corroded steel bars and 20 specimens with corroded steel bars. Experimental results indicate that under the accelerated corrosion condition, the surface profile of corroded steel bars has self-similarity, which can be described by fractal theory. Different surface characteristics of corroded steel bar have some influence on mechanical property degradation of steel bars. For example, stress-strain curve changes obviously, the yield strength and ultimate strength decrease, the yield platform is shortened until disappears. After statistical analysis, the regression formula of elastic modulus, yield strength, ultimate strength, ultimate strain and other mechanical properties of corroded steel bar were obtained. Based on analysis of experimental results, a constitutive model of steel bar related to characteristic parameters of corroded surface was established. Above results can be applied to the calculation and evaluation of corroded steel bar reinforced concrete structures.

Keywords: steel bar; corrosion; mechanical property; fractal characteristics