



锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力计算 及破坏截面预测*

吴锋^{1,2}, 张章², 邱松²

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

摘要: 通过锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力试验, 在已经提出的基于锈胀裂缝宽度的锈蚀率计算方法基础上, 根据承载力试验结果建立了基于计算锈蚀率的锈蚀梁承载力计算方法, 同时提出了锈蚀梁危险截面位置的预测方法, 与已有研究成果的对比表明, 该方法具有良好的准确性和实用性, 可以为锈蚀梁残余承载力和危险截面的预测提供参考。

关键词: 梁; 承载力; 计算锈蚀率

中图分类号: U 654

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0020-04

Calculation of flexural capacity and prediction of failure section of corroded concrete beams

WU Feng^{1,2}, ZHANG Zhang², QIU Song²

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Third Harbour Engineering Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The forms and characteristics of the corroded beams are analyzed through flexural capacity test for corroded beams. According to test results and corrosion rate calculation method obtained by the authors, calculation method of flexural capacity for corroded beams, as well as dangerous section prediction method is established. Compared to existing research results, adequate accuracy and practicability of this method can provide reference for residual flexural capacity and dangerous section prediction of corroded beams.

Key words: beam; bearing capacity; calculating corrosion rate

混凝土中钢筋锈蚀主要有两种形式: 均匀锈蚀和坑蚀^[1], 其中坑蚀是自然环境下混凝土中钢筋锈蚀的主要形式, 国内外对锈蚀钢筋混凝土(RC)构件力学性能的研究大部分都是基于均匀锈蚀而进行的, 考虑坑蚀影响的研究并不多^[2]。目前用于计算受弯构件性能退化的参数主要包括: 钢筋平均锈蚀率^[3-6] (以质量损失或截面损失表示)、锈胀裂缝宽度平均值^[7]或最大值^[8-9]、锈坑深度、钢筋直径、锈蚀时间、锈蚀电流密度、外观评估、混凝土保护层脱落情况等。其中, 基于钢筋锈蚀率的构件性能退化计算模型最多, 但平

均锈蚀率对钢筋整体的锈蚀情况仅仅是大概的描述, 在不均匀锈蚀条件下, 锈蚀集中的位置通常是危险位置, 平均锈蚀率作为计算参数不能很好地反映钢筋真实的锈蚀情况, 这给构件剩余性能的预测带来不确定性。锈坑深度相对于钢筋长度来说十分微观, 且和钢筋锈蚀率一样必须在破坏混凝土包裹层后才能精确测量; 以锈蚀时间和锈蚀电流密度作为参数太过理想化, 构件在使用过程中遭遇到的各种情况无法被全面考虑到; 而外观评估和混凝土保护层脱落情况基于主观判断, 准确性更难以保证。

收稿日期: 2013-12-11

*基金项目: 交通部交通建设科技项目基金 (201332849A090)

作者简介: 吴锋 (1978—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事港口工程混凝土结构研究工作。

笔者在文献[10]中提供了一种在不均匀锈蚀情况下, 基于锈胀裂缝宽度修正值的钢筋最大锈蚀率计算方法:

$$\rho = \frac{4kc(d+c)}{\pi d^2(d+2c)(n-1)}w + \frac{d_1^2 - d^2}{d^2(n-1)} \quad (1)$$

式中: ρ 为最大计算锈蚀率; w 为修正后的裂缝宽度; k 为铁锈流出折减系数; c 为保护层厚度; d 为钢筋原直径; n 为锈蚀体积膨胀率; d_1 为钢筋锈后名义直径。

本文将延续文献[10]的研究, 通过锈蚀 RC 梁抗弯承载力试验结果, 建立基于最大计算锈蚀率的锈蚀 RC 梁承载力退化计算方法和破坏截面预测方法。

1 试验

梁尺寸如图 1 所示, 混凝土强度等级为 C25, 保护层厚度为 28 mm; 纵向受拉钢筋单层布置, 采用 2 根 HRB335 级热轧钢筋, 直径为 14 mm, 锚固长度为 180 mm, 其中伸入支座 70 mm, 在支座处上弯 110 mm。采用基于法拉第定律的电解液加速锈蚀试验方法, 试验 8 根梁, 其中 7 根锈蚀, 1 根不锈蚀。试验梁在 NaCl 溶液浸泡下通电若干天后, 每根梁的底面或侧面均有 1 条顺筋锈胀裂缝对应 1 根纵筋, 按照等间距 150 mm 沿梁纵向设置 12 个测点, 使用裂缝宽度测量仪精确测量每个测点位置的混凝土裂缝宽度值。

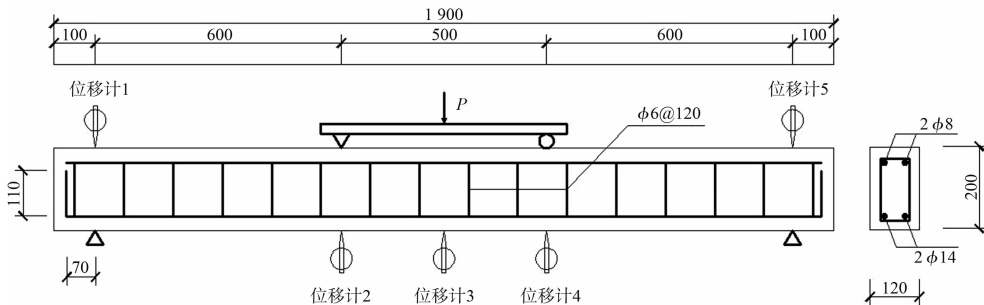


图 1 试验梁尺寸及加载方案

2 承载力计算模型及破坏截面位置预测

2.1 抗弯承载力计算模型

将锈蚀梁与不锈蚀梁的承载力比值定义为承载力折减系数, 根据试验结果得到的折减系数基于平均锈蚀率的分布见图 2, 并与金伟良等^[3]、惠云玲等^[8]的试验结果进行了对比, 其中文献[3]以锈蚀率为 0.47% 梁的承载力作为不锈蚀梁承载力数据。

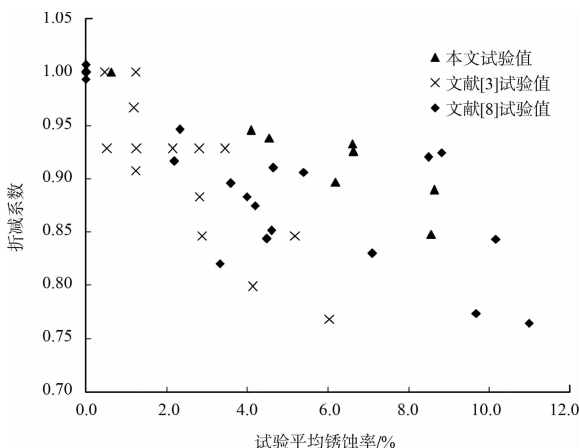


图 2 抗弯承载力折减系数与平均锈蚀率的关系

从图 2 可以看出, 锈蚀梁承载力随锈蚀率的增大呈下降趋势, 但试验结果较离散。即使是同一研究者的试验结果离散性也很大, 如文献[3]试验结果显示, 锈蚀率在 1% 左右时, 承载力退化系数在 0.9 ~ 1.0 分布, 如果按照图 2 所示的试验结果进行折减系数的拟合, 误差会较大, 文献[8]及本文试验结果也存在类似的问题。出现这种现象的主要原因在于, 图 2 是基于钢筋平均锈蚀率得到的, 对于两根总锈蚀量差别不大的试验梁, 平均锈蚀率也不大。然而每根梁的不均匀锈蚀情况存在随机的差异, 这种差异主要体现在集中锈蚀的位置和锈蚀量不同, 因此在理论推导或试验拟合锈蚀梁性能退化计算模型时, 不能仅仅以平均锈蚀率作为计算参数, 还必须考虑不均匀锈蚀的影响。

本文所做的锈蚀梁抗弯承载力试验结果显示, 梁的破坏形式均为适筋梁受弯破坏, 破坏截面均位于纯弯段或纯弯段与剪弯段交界位置。根据式

(1)得到的危险点最大锈蚀率计算值，取每根梁位于纯弯段的最大计算锈蚀率及其对应的承载力试验值作为数据标本(图3)，拟合得到基于计算锈蚀率的承载力退化折减系数的计算公式。

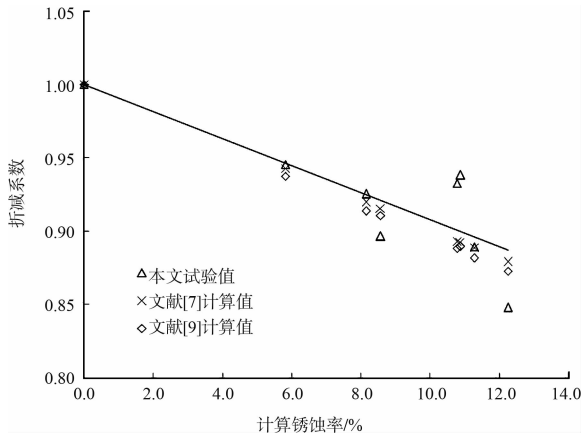


图3 抗弯承载力折减系数与计算锈蚀率的关系

观察到折减系数与计算锈蚀率散点大致呈线性分布，根据试验结果拟合出锈蚀梁抗弯承载力折减系数的计算公式：

$$\lambda = -0.922\rho + 1 \quad \rho < 13\% \quad (2)$$

式中： ρ 为最大计算锈蚀率，按照式(1)计算得出。则锈蚀梁某截面的抗弯承载力 M' 采用式(3)计算：

$$M' = \lambda \times M \quad (3)$$

式中： M 为不锈蚀梁抗弯承载力。通过一组锈胀裂缝宽度作为计算参数，通过式(1)得到计算锈蚀率，再根据式(2)和式(3)得到锈蚀率承载力，既具有足够的准确性，也易于操作。

2.2 破坏截面位置预测

需要注意的是，式(2)是在已知破坏截面位置的情况下，根据试验结果拟合得到的。实际工程中破坏截面位置一般是未知的，某些情况下可能出现最薄弱截面并非最大受力截面的情况，也可能出现最大锈蚀率位置的梁截面受荷不大的情况，仅仅以梁的最大锈蚀率来代表整个梁的残余承载力也是不合理的。

RC梁的抗弯承载力是由截面尺寸、混凝土强度及配筋等因素决定的。沿梁纵向任意截面的抗弯承载力不一定相同，为体现这一点，以 M_i 作为

i 截面不锈蚀的原始承载力，可根据截面尺寸、混凝土强度及配筋等条件计算得出。梁锈胀开裂后，按照文献[10]提出的方法确定若干个危险测点，危险测点对应的 i 截面残余承载力 M'_i 可根据式(3)计算得出，对于多个危险截面，式(3)可由式(4)代替：

$$\begin{bmatrix} M'_1 \\ M'_2 \\ \vdots \\ M'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & & & \\ & M_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & M_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

将残余承载力向量 $[M'_1, M'_2, \dots, M'_n]^T$ 与截面荷载效应向量 $[S'_1, S'_2, \dots, S'_n]^T$ 进行对比，即可判断最危险截面位置及构件整体承载力退化情况。

定义富余承载力向量：

$$[R'_1, R'_2, \dots, R'_n]^T = [M'_1, M'_2, \dots, M'_n]^T - [S'_1, S'_2, \dots, S'_n]^T \quad (5)$$

$$\min(R'_1, R'_2, \dots, R'_n) = R'_j \quad (6)$$

若 $R'_j < 0$ ，梁在理论上已经破坏；若 R'_j 接近于 0，则危险截面为 j 截面，残余承载力为 M'_j ；若 R'_j 不接近于 0，则危险截面不在上述几个危险测点位置。

3 试验结果验证

以 B-7 和 B-8 为例，验证预测方法的正确性。不锈蚀梁 B-9 的抗弯承载力试验值为 69.7 kN，破坏弯矩为 20.91 kN·m。由于尺寸及构造完全相同，B-7 和 B-8 的初始承载力与 B-9 也相同。

3.1 锈蚀梁 B-7

锈后 B-7 破坏荷载试验值为 65.4 kN。裂缝宽度实测值见图 4，危险点为第 1 点 (0.40 mm)、第 4 点 (0.56 mm)、第 10 点 (0.30 mm)，按式(1)得到的计算锈蚀率分别为 6.50%，10.88% 和 8.56%，代入式(2)得到折减系数分别为 0.946，0.952 和 0.910，则残余承载力向量为：

$$\begin{bmatrix} M'_1 \\ M'_4 \\ M'_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20.91 & & \\ & 20.91 & \\ & & 20.91 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.940 \\ 0.900 \\ 0.921 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19.66 \\ 18.82 \\ 19.26 \end{bmatrix}$$

计算荷载效应向量, 富余承载力向量为:

$$\begin{bmatrix} R'_1 \\ R'_4 \\ R'_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M'_1 \\ M'_4 \\ M'_{10} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S'_1 \\ S'_4 \\ S'_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19.66 \\ 18.82 \\ 19.26 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1.64 \\ 16.35 \\ 9.81 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18.02 \\ 2.47 \\ 9.45 \end{bmatrix}$$

$$\min(18.02, 2.47, 9.45) = 2.47$$

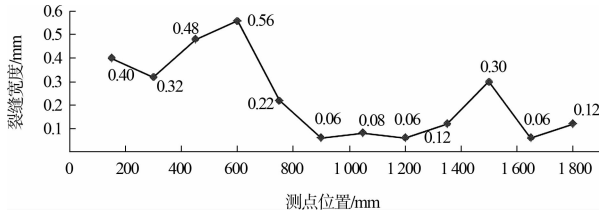


图 4 B-7 裂缝测点与裂缝宽度值分布曲线

因此危险截面在第 4 测点附近, 试验结果与计算结果较接近, 最终的破坏截面位于加载点附近的 2# 裂缝位置。

3.2 锈蚀梁 B-8

锈后 B-8 破坏荷载试验值为 65.9 kN。裂缝宽度实测值见图 5, 危险点为第 5 点 (0.36 mm)、第 8 点 (0.30 mm)、第 11 点 (0.62 mm), 按式(1)得到的计算锈蚀率分别为 5.82%、5.25% 和 9.67%, 代入式(2)得到折减系数分别为 0.946, 0.952 和 0.910, 则残余承载力向量

$$\begin{bmatrix} M'_5 \\ M'_8 \\ M'_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20.91 & & \\ & 20.91 & \\ & & 20.91 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.946 \\ 0.952 \\ 0.910 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19.78 \\ 19.90 \\ 19.05 \end{bmatrix}$$

计算出荷载效应向量, 则富余承载力向量为:

$$\begin{bmatrix} R'_5 \\ R'_8 \\ R'_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M'_5 \\ M'_8 \\ M'_{11} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S'_5 \\ S'_8 \\ S'_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19.78 \\ 19.90 \\ 19.05 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 19.77 \\ 19.77 \\ 4.94 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.13 \\ 14.11 \end{bmatrix}$$

$$\min(0.01, 0.13, 14.11) = 0.01,$$

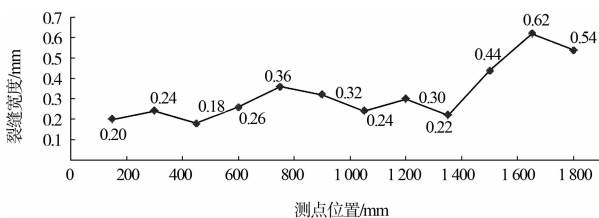


图 5 B-8 裂缝测点与裂缝宽度值分布曲线

因此危险截面在第 5 测点附近, 试验结果与计算结果较接近, 说明最大锈蚀率位置不一定是破坏

截面位置。

4 结语

1) 本文基于笔者已经提出的基于锈胀裂缝宽度的计算锈蚀率计算方法, 通过锈蚀梁抗弯承载力试验, 建立了基于计算锈蚀率的锈蚀梁承载力计算方法, 通过与目前已有计算方法的对比, 该方法具有良好的准确性和实用性。

2) 根据对锈蚀梁承载力试验现象的观察, 分析了锈蚀梁受力横向裂缝的开展形式和特点, 并依据提出的承载力计算方法, 建立了锈蚀梁危险截面位置的预测方法, 试验结果表明该预测方法较为准确。

参考文献:

- [1] 金伟良, 夏晋. 坑蚀对钢筋混凝土梁抗弯承载力的影响[J]. 建筑结构, 2009, 39(4): 100-111.
- [2] Torres-Acosta A, Navarro-Gutierrez S, Teran-Guillen J. Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams [J]. Engineering Structures, 2007, 29(6): 1 145-1 152.
- [3] 金伟良, 赵羽习. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯强度的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(5): 9-11.
- [4] Mangat P S, Elgarf M S. Strength and serviceability of repaired reinforced concrete beams undergoing reinforcement corrosion [J]. Magazine of Concrete Research, 1999, 51(2): 97-112.
- [5] Ballim Y, Reid J C. Reinforcement corrosion and the deflection of RC beams-an experimental critique of current test methods [J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(6): 625-632.
- [6] 范颖芳, 周晶, 黄振国. 受氯化物腐蚀钢筋混凝土构件承载力研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(5): 3-5.
- [7] 孙彬, 牛荻涛, 王庆霖. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力计算方法[J]. 土木工程学报, 2008, 41(11): 1-6.
- [8] 惠云玲, 李荣, 林志伸, 等. 混凝土基本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究[J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 14-18.
- [9] 牛荻涛, 卢梅, 王庆霖. 锈蚀钢筋混凝土梁正截面受弯承载力计算方法研究[J]. 建筑结构, 2002, 32(10): 14-17.
- [10] 吴锋, 张章, 龚景海. 基于锈胀裂缝的锈蚀梁钢筋锈蚀率计算[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 144-150.