



锈蚀钢筋混凝土梁抗弯刚度退化研究

吴锋^{1,2}, 卓杨², 张章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: 在大量锈蚀钢筋混凝土梁试验数据的基础上, 计算得到不同锈蚀方式和锈蚀率等情况下试验梁的抗弯刚度退化系数, 拟合给出钢筋锈蚀率与梁抗弯刚度退化系数的理论计算公式, 并通过对新制作的钢筋混凝土试验梁通电加速腐蚀试验, 验证计算公式的可靠性和准确性。

关键词: 钢筋锈蚀; 钢筋混凝土梁; 抗弯刚度; 刚度退化系数

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)03-0086-05

Degradation of flexural stiffness of reinforced concrete beams

WU Feng^{1,2}, ZHUO Yang², ZHANG Zhang²

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

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

Abstract: Based on a large number of test data of corroded reinforced concrete beam, flexural stiffness degradation coefficient about different corrosion methods and corrosion rate are obtained and a theoretical calculation formula of beam flexural stiffness degradation coefficient and rebar corrosion rate is fit. Then the reliability and accuracy of the formula are verified through the new reinforced concrete test beam of accelerated corrosion test.

Key words: rebar corrosion; reinforced concrete beam; flexural stiffness; stiffness degradation coefficient

钢筋混凝土构件在役期间, 由于多方面因素的综合作用, 导致钢筋锈蚀、混凝土保护层开裂、截面面积削弱, 从而使其刚度退化、变形增大, 过早地丧失其正常使用功能。研究锈蚀钢筋混凝土构件的刚度, 可为结构在正常使用荷载下的挠度验算和超静定结构的内力分析及结构动力分析奠定基础, 因此, 科学评估锈蚀构件的刚度是混凝土结构耐久性评估和既有结构抗震能力分析的关键。

钢筋锈蚀对混凝土梁抗弯刚度的影响主要体现在钢筋截面积的减小和混凝土与钢筋之间的粘结力退化两个方面。现有的研究主要是通过考虑构件截面损伤、钢筋截面积减小、材料力学性能劣化、混凝土与钢筋之间粘结力退化等因素对已

有的刚度计算公式进行修正, 修正的方法主要是对构件短期计算刚度进行折减或对构件短期刚度计算公式中的钢筋应变不均匀系数进行调整^[1-2], 现有成果在研究抗弯刚度退化时存在一些问题, 如对构件短期计算刚度的折减并未考虑到钢筋锈蚀时对抗弯刚度的影响是非线性的, 以及钢筋锈蚀至与混凝土无粘结后所表现出的恒定的构件抗弯刚度, 未对钢筋应变不均匀系数的修正参数给出计算公式, 在使用上缺乏统一性, 易受人为因素影响。

1 锈蚀梁抗弯刚度退化模型

由于钢筋锈蚀作用的复杂性, 很难单独定量分析两种因素对抗弯刚度的影响, 采用对构件短

收稿日期: 2012-06-29

作者简介: 吴锋(1978—), 男, 高级工程师, 从事港工结构工作。

期刚度直接进行折减的方法, 建立锈蚀构件刚度计算公式

$$B_T = \alpha B \quad (1)$$

式中: B_T 为锈蚀钢筋混凝土构件的短期刚度; α 为抗弯刚度退化系数; B 为未发生锈蚀钢筋混凝土构件的短期抗弯刚度值。

本文在已有研究成果基础上, 收集整理了大量不同锈蚀程度的钢筋混凝土梁的试验数据^[3-14], 收集整理的锈蚀钢筋混凝土构件抗弯试验的数据如表1所示, 锈蚀钢筋混凝土构件的取得主要通过暴露试验和电化学加速腐蚀2种方法。

表1 锈蚀钢筋混凝土构件抗弯试验

文献	构件数量	构件尺寸/mm			腐蚀方式
		长	宽	高	
[3]	6	1 500	100	160	暴露试验电化学腐蚀
[4]	1	1 900	120	200	电化学腐蚀
[5]	3	1 460	80	140	电化学腐蚀
[6]	1	3 000	150	280	暴露试验
[7]	3	1 700	120	200	电化学腐蚀
[8]	1	5 000	200	400	电化学腐蚀
[9]	4	1 800	150	180	电化学腐蚀
[10]	6	2 200	100	180	电化学腐蚀
[11]	4	550	100	120	电化学腐蚀
[12]	6	2 400	200	300	电化学腐蚀
[13]	14	2 400	150	250	暴露试验
[14]	15	1 400	100	160	电化学腐蚀

抗弯试验所采用的加载方式基本有单点和两点加载2种(图1)。根据荷载挠度理论计算公式, 可得荷载与跨中挠度的关系, 见式(2)。

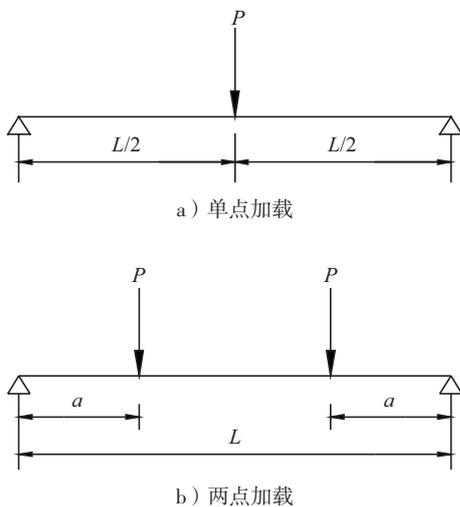


图1 抗弯试验加载示意图

$$f = \begin{cases} \frac{PL^3}{48B} & \text{(单点加载)} \\ \frac{PaL^2}{24B} \left[3 - 4\left(\frac{a}{L}\right)^2 \right] & \text{(单点加载)} \end{cases} \quad (2)$$

在试验梁整个加载过程中, 梁刚度的变化受钢筋锈蚀和开裂程度双重影响, 当试验构件没有出现开裂时, 发生锈蚀的梁和未发生锈蚀的梁挠度之比即为钢筋锈蚀引起的梁刚度退化系数, 由式(2)可得统一的抗弯刚度退化系数计算公式(3)。

$$\alpha = \frac{B_T}{B} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_T L^3 / PL^3}{48f_T / 48f} \\ \frac{P_T a L^2 \left[3 - 4\left(\frac{a}{L}\right)^2 \right]}{24f_T \left[3 - 4\left(\frac{a}{L}\right)^2 \right]} \\ \frac{P a L^2 \left[3 - 4\left(\frac{a}{L}\right)^2 \right]}{24f \left[3 - 4\left(\frac{a}{L}\right)^2 \right]} \end{array} \right\} = \frac{P_T f}{f_T P} \quad (3)$$

根据上述理论计算公式, 对试验数据进行整理分析(表2), 计算得到的抗弯刚度退化系数 α 与钢筋锈蚀率拟合的关系曲线如图2所示。

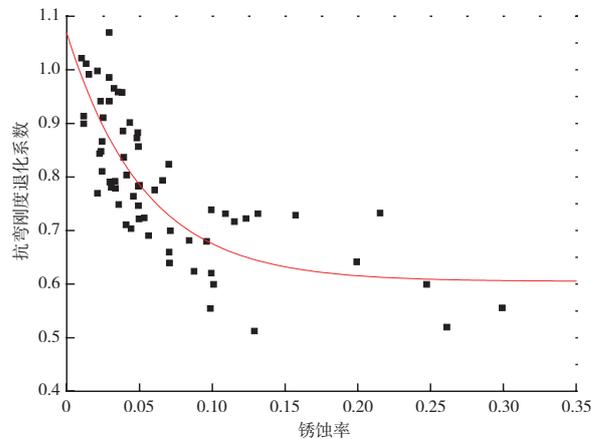


图2 锈蚀率与抗弯刚度退化系数的关系

对抗弯刚度退化系数 α 进行拟合得到计算公式

$$\alpha = 0.464e^{-\eta/0.053} + 0.605 \quad (4)$$

式中: η 为锈蚀率。公式(4)考虑了钢筋锈蚀时对抗弯刚度的非线性影响, 从公式中可以看出: 随着锈蚀率的增加, 钢筋混凝土梁抗弯刚度退化系数逐渐降低, 当锈蚀率高于15%时, 抗弯刚度退化系数趋于稳定。

2 锈蚀梁抗弯刚度退化试验研究

为了校核拟合公式的准确性, 设计制作了8根钢筋混凝土试验梁, 如图3所示, 试验梁轴心长度

表2 刚度退化系数的计算

文献	无锈蚀梁		锈蚀率	锈蚀梁		刚度退化系数 α
	荷载/kN	挠度/mm		荷载/kN	挠度/mm	
[3]	46.3	4.40	0.011 0	47.8	4.45	1.020
			0.016 0	46.0	4.42	0.990
			0.024 0	45.6	4.61	0.940
			0.014 0	47.0	4.42	1.010
			0.030 0	45.5	4.60	0.940
			0.044 0	44.0	4.65	0.900
[4]	54.0	5.65	0.050 0	47.0	5.75	0.855
[5]	24.6	5.90	0.100 0	21.6	7.03	0.737
			0.200 0	19.0	7.12	0.640
[6]	61.0	7.45	0.300 0	14.9	6.45	0.554
			0.216 0	48.0	8.02	0.731
[7]	46.9	5.56	0.029 8	50.8	5.64	1.068
			0.033 2	44.9	5.52	0.964
			0.038 8	44.4	5.51	0.956
[8]	103.0	6.72	0.100 0	75.9	8.00	0.619
[9]	124.5	6.37	0.158 0	108.8	7.66	0.727
	67.5	2.50	0.248 0	70.0	4.34	0.598
	91.7	6.00	0.057 0	78.3	7.44	0.689
	83.3	4.29	0.262 0	44.0	4.37	0.518
[10]	17.5	9.55	0.012 5	15.5	9.27	0.912
			0.025 0	14.0	8.83	0.865
			0.050 0	12.3	8.59	0.781
			0.012 5	12.1	7.67	0.898
			0.025 0	10.4	7.32	0.809
[11]	96.1	2.57	0.050 0	8.8	6.72	0.745
			0.071 0	86.9	2.83	0.822
			0.124 0	82.1	3.05	0.721
			0.132 0	61.5	2.25	0.730
			0.024 3	164.0	5.89	0.846
[12]	232.0	7.05	0.0490	190.0	6.63	0.871
			0.041 5	148.0	6.34	0.709
			0.061 2	132.0	5.18	0.774
			0.129 7	132.0	7.85	0.511
			0.099 5	120.0	6.59	0.553
[13]	48.1	2.90	0.021 8	50.0	3.03	0.996
			0.029 9	42.4	2.60	0.984
			0.049 6	43.8	3.00	0.881
			0.039 3	48.3	3.29	0.884
			0.025 7	53.0	3.52	0.909
			0.034 0	50.0	3.82	0.790
			0.050 8	51.3	3.95	0.783
			0.030 4	52.0	3.97	0.789
			0.066 7	47.0	3.58	0.792
			0.031 3	49.5	3.83	0.779
			0.036 4	45.5	3.67	0.747
			0.050 5	38.8	3.25	0.720
			0.071 4	37.5	3.54	0.638
0.034 2	52.0	4.03	0.777			
0.071 9	36.3	3.14	0.698			

续表

文献	无锈蚀刚度 / (MN·m ²)	锈蚀率	锈蚀后刚度 / (MN·m ²)	刚度退化系数 α
[14]	2.299	0.071 1	1.513	0.658
	2.478	0.101 7	1.482	0.598
	2.528	0.084 9	1.719	0.680
	2.553	0.036 0	2.443	0.957
	2.488	0.022 0	1.911	0.768
	2.472	0.044 9	1.735	0.702
	2.503	0.039 9	2.090	0.835
	2.501	0.054 0	1.806	0.722
	2.420	0.042 0	1.941	0.802
	3.152	0.023 3	2.654	0.842
	3.127	0.046 5	2.383	0.762
	2.564	0.109 9	1.872	0.730
	2.190	0.096 8	1.485	0.678
	2.056	0.088 2	1.279	0.622

1 900 mm, 截面高200 mm, 宽120 mm, 混凝土强度等级为C30, 混凝土保护层厚度为28 mm; 纵向受拉钢筋单层布置, 采用2根HRB335级直径为14 mm的热轧钢筋, 纵筋锚固长度为180 mm, 其中伸入支座70 mm, 在支座处上弯110 mm。由于本研究主要关注纵向受拉钢筋锈蚀后性能, 因此要将受拉钢筋与箍筋绝缘。绑扎钢筋时先按照箍筋间距在纵筋上标记与箍筋接触点, 并用绝缘胶带在接触点附近缠绕几圈然后绑扎, 绑扎后在接触点涂抹环氧树脂。

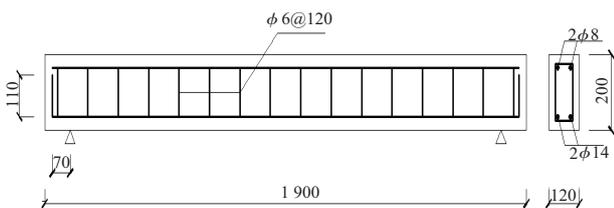


图3 钢筋混凝土梁配筋

腐蚀试验采用电化学方法进行梁内钢筋的快速锈蚀。具体方法为: 将试验梁浸泡在5%NaCl溶液的腐蚀槽中72 h, 液面高度为40 mm, 基本淹没纵筋。梁中下部颜色变深时, 混凝土孔隙中已经被NaCl溶液充满, 此时将连接纵筋的导线与恒定直流电源的阳极相接, 而直流电源的阴极则与溶液中的不锈钢板相连接, 通过NaCl溶液形成回路, 使阳极的钢筋锈蚀。通过控制电流大小和通电时间的长短, 根据法拉第定律可以控制梁内钢筋的锈蚀量。试验梁腐蚀情况如表3所示。

表3 试验梁腐蚀率

试验梁	锈蚀率/%	
	目标值	实测值
B-1	7.5	6.64
B-2	10.0	8.57
B-3	7.5	6.19
B-4	10.0	8.64
B-5	7.5	6.62
B-6	7.5	6.61
B-7	5.0	4.09
B-8	5.0	4.62

抗弯结构试验采用单跨简支梁形式, 使用一台千斤顶通过分配梁以二集中力对称加载, 在千斤顶上安置一只应变式压力传感器, 通过手持式应变仪及油压表来控制加载量值; 采用长标距百分表对试验桩挠度进行量测, 测点布置在桩底受拉处, 试验方式如图3所示。

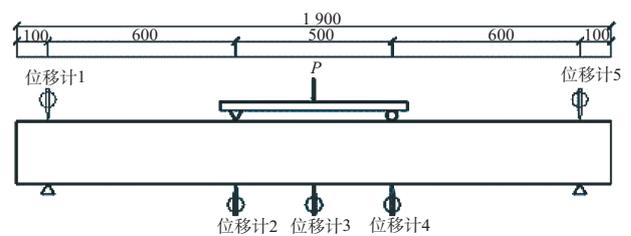


图3 抗弯试验加载示意图

根据锈蚀梁抗弯试验结果数据, 推算试验梁锈蚀后的抗弯刚度, 并与其理论抗弯刚度相比, 得到抗弯刚度退化系数 α (表4)。由表4中可以看

出，试验数据与理论公式吻合较好。

表4 试验梁抗弯刚度

试验梁	锈蚀后抗弯刚度/ (MN·m ²)	无锈蚀抗弯刚度/ (MN·m ²)	退化系数	
			试验值	计算值
B-1	2.30	2.92	0.787	0.738
B-2	2.32	2.92	0.796	0.697
B-3	1.93	2.92	0.660	0.749
B-4	2.22	2.92	0.760	0.696
B-5	2.48	2.92	0.849	0.738
B-6	2.10	2.92	0.718	0.738
B-7	2.20	2.92	0.752	0.819
B-8	2.42	2.92	0.828	0.799

3 结论

1) 对钢筋锈蚀引起的混凝土梁抗弯刚度退化进行研究，在收集整理的大量试验数据的基础上，给出钢筋锈蚀率与混凝土梁抗弯刚度退化系数的理论计算公式。

2) 制作了8根钢筋混凝土试验梁，采用电化学加速腐蚀法并进行抗弯结构试验，将试验得到的数据与拟合的公式进行对比。结果表明：计算公式与试验数据符合较好，具有较好的准确性和实用性。

参考文献:

[1] 任宝双, 钱稼茹, 聂建国. 在用钢筋混凝土筒支桥面梁受弯刚度估算[J]. 工业建筑, 2001, 31(1): 13-15.

[2] 孙彬, 牛荻涛, 王应生. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯刚度评估方法研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(2): 68-72.

[3] 袁迎曙, 章鑫森, 姬永生. 人工气候与恒电流通电法加

速锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能比较研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 42-46.

[4] 袁迎曙, 贾福萍, 蔡跃. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 47-52.

[5] Yamamoto T, Oyado M, Mikata Y. Systematic laboratory test on structural performance of corroded reinforced concrete and its utilization in practice[C]// Modelling of Corroding Concrete Structures, 2010: 113-124.

[6] Khan I, Francois R, Castel A. Mechanical behavior of long-term corroded reinforced concrete beam[C]// Modelling of Corroding Concrete Structures, 2010: 243-258.

[7] 王海超, 贡金鑫, 何世钦. 腐蚀环境相同应力水平混凝土梁的静动力性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(11): 1 526-1 528.

[8] 刁进东. 腐蚀预应力混凝土结构力学性能的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

[9] 李冰. 局部区段锈蚀的钢筋混凝土梁抗剪承载力试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.

[10] 赵新. 锈蚀钢筋混凝土梁工作性能的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.

[11] 宋小雷. 锈蚀钢筋混凝土梁静力及疲劳性能试验研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2008.

[12] 罗亭. 锈蚀钢筋混凝土受弯构件的抗弯刚度计算及裂缝特征研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.

[13] 孙彬. 在役钢筋混凝土结构的性能退化与抗震性能评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.

[14] 宋嘉文. 荷载和氯离子作用下钢筋混凝土梁性能退化规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

(本文编辑 郭雪珍)

