

文章编号:1007-9629(2011)06-0844-06

混凝土中钢筋锈蚀深度预测模型

徐 港¹, 费红芳¹, 刘德富¹, 王 青^{1,2}, 卫 军²

(1. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 通过对在自然环境下经历 2 a 干湿循环作用的锈蚀钢筋混凝土试件的试验研究,探讨了保护层锈胀开裂后钢筋的锈损程度及其影响因素. 依据试验结果,运用数理统计相关知识,对试件的锈蚀特征进行分析,建立了与保护层厚度、表面裂缝宽度、钢筋直径、混凝土强度等级及箍筋间距相关的混凝土中钢筋锈蚀深度预测模型;对模型进行参数敏感性分析表明,表面纵向锈胀裂缝宽度是影响钢筋锈蚀深度的最主要因素,除其他因素外,箍筋间距对纵向钢筋锈蚀深度也具有一定影响,且随箍筋间距减小影响程度逐渐显著;经试验验证,所建立模型具有较强的适用性.

关键词: 钢筋混凝土; 锈蚀; 干湿循环; 箍筋; 锈蚀深度; 预测模型

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2011.06.024

Prediction Model on the Rebar Corrosion Depth in Concrete

XU Gang¹, FEI Hong-fang¹, LIU De-fu¹, WANG Qing^{1,2}, WEI Jun²

(1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. School of Civil Engineering & Architecture, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: By the wet-dry cycle test on reinforced concrete specimens under natural conditions for two years, corrosion degree of rebars after concrete cover cracking and its influencing factors were measured. Based on the test results, applying the knowledge of mathematical statistics to analyze the corrosion characteristics of samples, a prediction model for the corrosion depth of reinforcement was established in relation to the concrete cover thickness, surface cracks width, bar diameter, concrete strength, stirrup spacing, and so on. The sensitivity analysis to model parameters shows that crack width on the surface is the most important factor for the corrosion depth of steel; stirrup spacing also has a significant effect on the corrosion depth of longitudinal reinforcement; the smaller the stirrup spacing is, the more remarkable the effect is. The experimental data show that the model is of good applicability.

Key words: reinforced concrete; corrosion; wet-dry cycle; stirrup; corrosion depth; prediction model

混凝土中钢筋锈蚀程度的确定是进行结构寿命评估的基础. 试验研究时可以通过构件破型来确定钢筋的锈蚀程度,但该法显然并不适用于对在役结构的检测. 当前无损检测技术已十分发达,但对于混凝土中钢筋锈蚀情况的测试仍局限在钢筋的腐蚀电位或电流的测定,仅可对锈蚀产生与否及其严重程度做出定性判别,尚无法定量描述钢筋的锈蚀程度.

为此,如果能利用结构的易获取信息,如混凝土强度、保护层厚度等来推算混凝土中钢筋的锈蚀量将具有重要意义. 基于这一思路,国内外学者对该问题进行了深入研究^[1-7],但现有成果主要存在两方面的不足,首先,大部分研究成果集中在锈蚀导致保护层胀裂之前,而对于保护层开裂后钢筋锈蚀深度的预测研究较少^[8],且研究结论多建立在通电锈蚀试验

收稿日期:2010-06-17; 修订日期:2010-08-17
基金项目:国家自然科学基金重点项目(50538070);铁道部重大科技项目(2008G031-18);高速铁路建造技术国家工程实验室开放基金项目;湖北省教育厅科学研究计划重点项目(D20091310)
第一作者:徐 港(1974—),男,内蒙古达茂旗人,三峡大学副教授,博士后,主要从事混凝土结构耐久性研究. E-mail: postxg@163.com

基础上,通电加速锈蚀法虽然可在较短时间内达到预定的锈蚀程度,对锈蚀量也可做出近似推断,但通电的锈蚀特征与自然锈蚀的相似性尚待进一步验证^[9-10];其次,已有模型几乎都未考虑箍筋对纵向裂缝产生和发展的影响,文献[11-12]表明,当箍筋间距较小时对钢筋锈胀力及开裂时间都有很明显的影 响,所以,忽略箍筋的存在是不合适的.为此,本文采用与工程构件相似的配筋试件,在自然环境下,通过长达 2 a 的干湿循环锈蚀试验,对该问题作了探索,建立了混凝土结构中钢筋锈蚀深度与混凝土强度、保护层厚度、钢筋直径、裂缝宽度及箍筋间距的预测模型,以期 为锈蚀钢筋混凝土结构耐久性相关问题的研究提供参考.

1 试验设计

1.1 试件设计

试件尺寸为 150 mm×150 mm×300 mm,其钢筋配置见图 1.混凝土强度分别为 C30,C40;保护层厚度分别为 25,30 mm;钢筋直径分别为 16,20 mm;箍筋间距分别为 250,120,40 mm.每种试件浇注 2 块,共 48 个.



图 1 试件的钢筋配置图
Fig. 1 Bars arrangement of specimen

1.2 材料及力学性能

水泥:C30 混凝土采用华新堡垒牌 P·C 32.5 复合硅酸盐水泥,C40 混凝土采用华新堡垒牌 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,其各项指标均达国家标准;砂:河砂,细度模数为 2.3,属Ⅱ区级配;石:卵石,粒

径为 5~20 mm,连续级配;水:自来水;钢筋:纵筋 HRB335;盐:采用 NaCl,掺盐率为水泥用量的 5%(质量分数).

混凝土配合比、28 d 标准立方体抗压强度平均值(f_{cu})见表 1.

表 1 混凝土配合比及力学性能						
Table 1 Mix proportion and mechanical properties of concrete						
Concrete grade	Mix proportion/(kg·m ⁻³)					f_{cu} /MPa
	Cement	Sand	Stone	Water	Salt	
C30	475.00	433.75	1 301.25	190.00	23.73	37.0
C40	473.82	434.05	1 302.14	190.00	23.69	40.9

1.3 试验方法及现象

为了真实模拟氯盐环境下钢筋混凝土构件的锈蚀特征,将试件置于室外,采用干湿循环的方法进行锈蚀,即把每个试件的底面放入质量分数为 3%、深度约等于保护层厚度(确保保护层的湿度,以加速钢筋锈蚀)的 NaCl 溶液中浸泡 3 d,再取出放置 3 d(如遇雨天超过 3 d 则等雨停后取出),共历时 2 a,直到所有试件表面产生锈胀裂缝便认为锈蚀完成.

锈蚀完成后观察发现,试件表面的裂缝有纵向、横向和斜角三种形态,见图 2,其中纵向裂缝最为显著,分布于底面(迎水面)或侧面,且侧面纵缝更多,绝大部分已沿纵筋贯通,平均宽度均大于正面纵缝.采用 DJCK-2 裂缝测宽仪测量试件表面裂缝宽度,最大宽度达 1.3 mm.记录裂缝形态与宽度后破型试件取出钢筋,按文献[13]的方法分别进行酸洗、烘干、称重、计算钢筋的质量损失和锈蚀率,再由文献[14]给出的公式(见式(1))求得钢筋平均锈蚀深度.选取纵缝贯通试件进行分析,试验数据详见表 2.

$$\delta = (d - d_{\rho}) / 2$$

(1)

式中: δ 为钢筋的平均锈蚀深度; d,d_{ρ} 分别为钢筋锈蚀前、后的公称直径,其中 $d_{\rho} = d \sqrt{1 - \rho}$, ρ 为钢筋的质量锈蚀率.

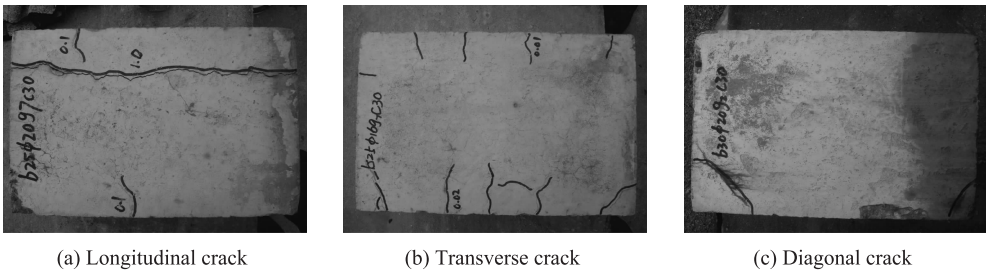


图 2 锈蚀试件的底面裂缝形态
Fig. 2 Surface crack patterns of corrosion specimen

表 2 试验数据
Table 2 Test data

Sample number	Strength grade	f_{cu} /MPa	c /mm	d /mm	Actual stirrup space/mm	The widest crack/mm	Corrosion depth/mm
1	C30	37.0	30	16	244.0	0.34	0.027 7
2	C30	37.0	30	16	244.0	0.14	0.051 2
3	C30	37.0	30	16	122.0	0.24	0.025 9
4	C30	37.0	30	16	122.0	0.00	0.034 0
5	C30	37.0	30	16	40.7	0.04	0.025 5
6	C30	37.0	30	16	40.7	0.30	0.053 0
7	C30	37.0	30	20	244.0	0.80	0.097 0
8	C30	37.0	30	20	244.0	0.10	0.021 0
9	C30	37.0	30	20	122.0	0.62	0.044 7
10	C30	37.0	30	20	122.0	1.30	0.064 3
11	C30	37.0	30	20	40.7	0.40	0.048 4
12	C30	37.0	30	20	40.7	0.08	0.038 4
13	C30	37.0	25	16	40.7	0.32	0.004 6
14	C30	37.0	25	16	40.7	0.60	0.041 6
15	C30	37.0	25	20	244.0	1.30	0.243 0
16	C30	37.0	25	20	244.0	1.00	0.116 1
17	C30	37.0	25	20	122.0	0.70	0.096 6
18	C30	37.0	25	20	122.0	0.50	0.038 8
19	C40	40.9	30	16	244.0	0.30	0.019 4
20	C40	40.9	30	16	244.0	0.20	0.031 5
21	C40	40.9	30	16	40.7	0.02	0.007 3
22	C40	40.9	30	16	40.7	0.18	0.030 6
23	C40	40.9	30	20	244.0	0.58	0.022 8
24	C40	40.9	30	20	244.0	0.36	0.066 2
25	C40	40.9	30	20	122.0	0.30	0.043 1
26	C40	40.9	30	20	122.0	0.46	0.071 8
27	C40	40.9	30	20	40.7	0.20	0.047 5
28	C40	40.9	30	20	40.7	0.10	0.038 6
29	C40	40.9	25	16	244.0	0.10	0.054 0
30	C40	40.9	25	16	244.0	0.42	0.068 0
31	C40	40.9	25	16	122.0	0.10	0.031 0
32	C40	40.9	25	16	122.0	0.08	0.002 3
33	C40	40.9	25	20	244.0	0.20	0.007 5
34	C40	40.9	25	20	244.0	0.32	0.016 4
35	C40	40.9	25	20	122.0	0.40	0.020 9
36	C40	40.9	25	20	122.0	1.10	0.138 4

2 预测模型的建立

根据试验数据,依据数理统计原理得到纵向钢筋锈蚀深度 δ 与混凝土强度(f_{cu})、保护层厚度(c)、钢筋直径(d)、箍筋间距(s)及保护层锈胀裂缝宽度(w)的经验公式,假设上述 5 个因素对 δ 的作用是相互独立的,则回归方程可以写成式(2)或式(3)的形式:

$$\delta = \sum_{i=1}^4 c_i f(A_i) \tag{2}$$

$$\delta = c_0 \prod_{i=1}^3 f(A_i) \tag{3}$$

式中: A_i 为独立变量; c_0, c_i 为回归系数.
常用的拟合函数有幂函数与指数函数,即:
$$f(A_i) = a_i^{A_i} \tag{4}$$

或
$$f(A_i) = A_i^{a_i} \tag{5}$$

式中: a_i 为回归系数.

分别采用式(4),(5)这 2 种函数形式,考虑以上 5 个因素对 δ 的影响,另外还考虑到一些文献^[15-17]也常把混凝土相对保护层厚度(c/d)作为独立的变量,综合各种可能情况,经排列组合共得到 50 种方程形式.进一步分析比较可得到其最优模型,即残差

的平方和最小的回归方程式:

$$\delta = 0.368\,8f_{\text{cu}}^{-0.299}0.929\,1^{c}0.999\,3^{d}1.002\,2^{s}4.207^{w}$$

(6)

由式(6)可见, δ 均随 f_{cu},c,d 的增大而减小,随 s 和 w 的增大而增大,这正与许多文献^[6,8,11,15-16,18-19]表述的试验现象一致。

3 敏感性分析

为了进一步确定是哪个因素对钢筋锈蚀深度的影响最大,可对式(6)进行敏感性分析.敏感性系数 λ_i 是基本参数偏移引起的纵向钢筋锈蚀深度(下文以函数 $f(D_i)$ 来表示)的相对变化,其定义为:

$$\lambda_i = \partial f(D_i) / \partial x_i$$

(7)

式中: ∂x_i 为参数 x_i 的相对偏移量; $\partial f(D_i)$ 为由 ∂x_i 引起的纵向钢筋锈蚀深度因子的相对变化。

通过设定参数偏移值的纵向钢筋锈蚀深度因子计算,可以得到它对不同参数变化的敏感性曲线.显然, λ_i 反映了参数 x_i 敏感性曲线的割线斜率, λ_i 越大,表示构件的参数变化愈容易造成其耐久性的不足,参数的危险性也愈大.因此,在实际工程中,可将敏感性系数较大的参数作为重点检测参数。

利用灵敏度分析方法计算诸因子对 δ 的影响程度,结果表明:试件表面 w 较其他几个因素而言对 δ 的影响最大,其余依次是 $f_{\text{cu}}>c>s>d$.比较发现 f_{cu} 与 c 对 δ 的影响相差不大;而 s 和 d 对 δ 的影响程度也相近,但前者略大于后者,这说明对于配箍试件,尤其是对于箍筋加密区构件的纵筋锈蚀深度预测,忽略箍筋影响是不合适的。

4 模型适用性验证

为了验证本文所建立模型的适用性,分别将试验数据、式(6)以及CECS 220:2007《混凝土结构耐久性评定标准》推荐公式(如式(8))的计算值绘于图3.由图3可见,本文模型与式(8)具有很好的相关性,两者变化趋势几乎同步,但式(8)的预测值普遍高于实测值,这可能正是由于忽略箍筋作用所致。

$$\delta = 0.086w + 0.008c/d + 0.000\,55f_{\text{cu}} + 0.015$$

$$(w \geq 0.1\text{ mm})$$

(8)

为了充分验证式(6)的适用性,尚需借助第三方的试验数据.但是从相关学者公开发表的文献来看,无论是基于实验室试验还是工程调查分析的成果,所提供的数据不是参数不详尽,就是采用的是典型化试件(钢筋位于试件中心,与实际构件配筋形式差异较大)且多采用的是通电快速锈蚀法,很难找到能完全适用于本文模型验证的数据(尤其是配筋试

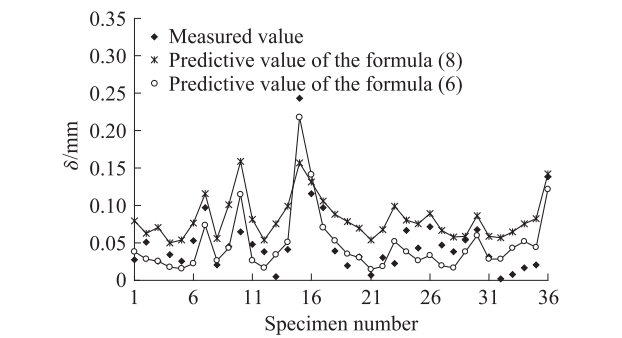


图 3 锈蚀深度实测值与预测值的比较
Fig. 3 Comparison between measured and predicted corrosion depth

件).考虑到文献[18]曾被多个研究者引用,具有一定的代表性,故从该文中选取与本文试件特征最为接近的30组相关试验数据(见表3)用于模型验证.表3中的试件编号1~30在文献[18]中对应编号为46~75.

表 3 文献[18]试验数据					
Table 3 Experimental data in reference[18]					
No.	f_{cu}/MPa	c/mm	d/mm	The widest crack/mm	Corrosion depth/mm
1	24.5	25	16	0.15	0.018 9
2	24.5	25	16	0.00	0.006 1
3	24.5	25	16	0.05	0.016 5
4	24.5	25	16	0.25	0.040 9
5	24.5	25	25	0.12	0.048 6
6	24.5	25	25	0.05	0.032 2
7	24.5	25	25	0.20	0.064 9
8	24.5	25	25	0.25	0.097 5
9	24.5	25	25	0.12	0.048 4
10	24.5	25	25	0.15	0.059 3
11	24.5	25	25	0.30	0.005 3
12	24.5	25	25	0.40	0.139 0
13	24.5	25	25	0.35	0.133 7
14	24.5	25	25	0.05	0.059 7
15	24.5	25	25	0.30	0.048 6
16	24.5	25	25	0.70	0.200 4
17	24.5	25	25	0.15	0.064 6
18	24.5	25	25	0.10	0.053 7
19	24.5	30	16	0.50	0.107 3
20	24.5	30	16	0.80	0.210 4
21	24.5	30	16	0.10	0.075 9
22	24.5	30	16	0.35	0.089 1
23	24.5	30	16	0.05	0.033 1
24	24.5	30	16	0.10	0.065 4
25	24.5	30	16	1.10	0.248 5
26	24.5	30	16	0.80	0.209 4
27	24.5	35	16	0.45	0.163 6
28	24.5	35	16	0.70	0.136 3
29	24.5	35	16	0.55	0.106 8
30	24.5	35	16	0.05	0.101 3

由于表3数据是基于无箍筋通电锈蚀试件得到的,为此在利用式(6)进行锈蚀深度计算时,存在着

箍筋间距的取值问题。由文献[11-12]可知,随箍筋间距增大,它对保护层锈胀开裂及锈胀裂缝宽度发展的影响逐渐减小,再考虑到本文模型的数据基础(最大箍筋间距 244 mm),故假设当 s 大于或等于 300 mm 时,其影响可以忽略不计。据此, s 取 300 mm,再分别将表 3 数据代入式(6),(8)进行计算并与实测值比较,结果如图 4 所示。

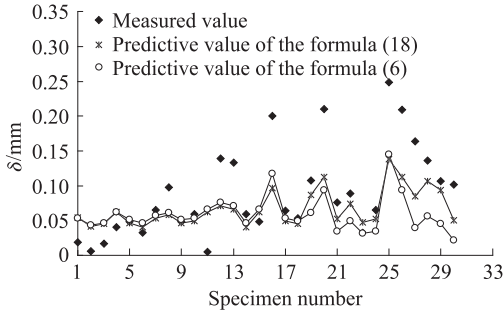


图 4 文献[18]锈蚀深度实测值与预测值比较

Fig. 4 Comparison between measured and predicted corrosion depth in reference[18]

由图 4 可见,即便对于无箍筋试件,本文预测模型与式(8)的预测结果也十分接近,且两者仍然保持良好的相关性,所反映锈蚀深度变化趋势仍一致。比较预测值与实测值不难发现,当钢筋锈蚀深度较小(约 0.05 mm)时,前者总体大于后者,而当锈蚀深度较大时,后者普遍大于前者。这正反映了采用通电快速锈蚀法的不足,即当锈蚀率较小,尤其是保护层开裂前,通电快速锈蚀试验的结果偏小^[20],而当保护层开裂后,由于腐蚀介质可以直达钢筋表面,电源正负极间电阻显著减小,电腐蚀效率大大增强,使得锈蚀产物顺缝流失现象严重,裂缝发展缓慢,造成按自然锈蚀模型预测结果偏低。

5 结语

(1)本文建立的可用于钢筋混凝土构件角区纵向钢筋平均锈蚀深度预测模型表明:试件表面锈胀裂缝宽度对钢筋锈蚀深度影响最大,其次分别为混凝土强度、保护层厚度、箍筋间距、钢筋直径。其中混凝土强度与保护层厚度对钢筋锈蚀深度的影响程度相近;箍筋间距和钢筋直径对钢筋锈蚀深度的影响程度相差不大,但前者大于后者,尤其当箍筋间距较小时(如箍筋加密区)。

(2)利用实测值及其他文献试验数据验证表明,本文新建模型与 CECS 220:2007 推荐的混凝土结构中角区变形钢筋平均锈蚀深度预测公式相关性良好,对无箍筋试件而言两者预测精度相近,对于配箍筋试件,新建模型预测值与本文试验数据更为接近。

但由于问题的复杂性和第三方试验数据的缺乏,模型的适用性尚需进一步验证。

参考文献:

- [1] BAZANT Z P. Physical model for steel corrosion in sea structures—Theory[J]. Journal of the Structural Division, 1979, 105(6):1137-1153.
- [2] ANDRADE C, ALONSO C, MOLINA F J. Cover cracking as a function of bar corrosion(part I): Experimental test[J]. Materials and Structures, 1993, 26(8):453-464.
- [3] LI C Q, LAWANWISUT W, ZHEN J J, et al. Crack width due to corroded bar in reinforced concrete structures[J]. International Journal of Materials & Structural Reliability, 2005, 3(2):87-94.
- [4] 赵羽习, 金伟良. 钢筋锈蚀导致混凝土构件保护层胀裂的全过程分析[J]. 水利学报, 2005, 36(8):939-945.
ZHAO Yu-xi, JIN Wei-liang. Analysis on the cracking of concrete cover due to rebar corrosion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(8):939-945. (in Chinese)
- [5] 袁迎曙, 姬永生, 牟艳君. 混凝土内钢筋锈蚀层发展和锈蚀量分布模型研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7):5-11.
YUAN Ying-shu, JI Yong-sheng, MU Yan-jun. Propagation and model of distribution for corrosion of steel bars in concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(7):5-11. (in Chinese)
- [6] 徐港, 卫军, 刘红庆. 钢筋非均匀锈蚀试验研究[J]. 华中科技大学学报, 2006, 34(5):111-114.
XU Gang, WEI Jun, LIU Hong-qing. The experimental study of the non-uniform corrosion of steel bars[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2006, 34(5):111-114. (in Chinese)
- [7] CHEN D. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation[J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30(3):227-238.
- [8] VIDAL T, CASTEL A, FRANCOIS R. Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(1):165-174.
- [9] 张伟平, 王晓刚, 顾祥林, 等. 加速锈蚀与自然锈蚀钢筋混凝土梁受力性能比较[J]. 东南大学学报, 2006, 36(SII):139-144.
ZHANG Wei-ping, WANG Xiao-gang, GU Xiang-lin, et al. Comparative study on structural performance of reinforced concrete beams subjected to natural corrosion and accelerated corrosion[J]. Journal of Southeast University, 2006, 36(SII):139-144. (in Chinese)
- [10] YUAN Y S, JI Y S. Comparison of two accelerated corrosion techniques for concrete structures[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(3):344-347.
- [11] 徐港, 刘德富, 卫军, 等. 箍筋对混凝土保护层锈胀开裂的影响[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2009, 33(2):257-259.
XU Gang, LIU De-fu, WEI Jun, et al. Effect of the stirrup on cracking of concrete cover due to reinforcement corrosion[J].

Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2009, 33(2): 257-259. (in Chinese)

[12] WANG Q, XU G, SUN Q, et al. Research on factors affecting longitudinal corrosion cracks in concrete structures [C]//The 4th International Symposium on Lifetime Engineering of Civil Infrastructure. Beijing: Science press, 2009: 430-433.

[13] JTJ 270—98 水运工程混凝土试验规程[S].
JTJ 270—98 Testing code of concrete in port and waterwog engineering[S]. (in Chinese)

[14] 卫军, 徐港, 王青. 锈蚀钢筋与混凝土粘结应力模型研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 112-116.
WEI Jun, XU Gang, WANG Qing. Bond strength modeling for corroded reinforcing bar in concrete [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 112-116. (in Chinese)

[15] 惠云玲. 混凝土结构中钢筋锈蚀程度评估和预测试验研究 [J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 6-9.
HUI Yun-ling. Assessment and predicted experimental study on corrosive degree of reinforcements in concrete structures [J]. Industrial Construction, 1997, 27(6): 6-9. (in Chinese)

[16] 牛荻涛, 王庆霖, 王林科. 锈蚀开裂后混凝土中钢筋锈蚀量的预测[J]. 工业建筑, 1996, 26(4): 11-13.
NIU Di-tao, WANG Qing-lin, WANG Lin-ke. Predetermination of steel corrosion extent in reinforced concrete structures after corrosion crack [J]. Industrial Construction, 1996, 26(4): 11-13. (in Chinese)

[17] RODRIGUEZ J, ORTEGA L M, CASAL J, et al. Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures [C]//7th International Conference on Durability of Building Materials and Components. Stockholm: [s. n.], 1996: 117-126.

[18] 王深. 钢筋混凝土结构锈胀裂缝的研究及耐久性评估[D]. 上海: 同济大学, 2000.
WANG Shen. The research on corrosion cracks of reinforced concrete structure and durability evaluation [D]. Shanghai: Tongji University, 2000. (in Chinese)

[19] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 83-85.
NIU Di-tao. Durability and life forecast of reinforced concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2003: 83-85. (in Chinese)