

半电池电位法评估海港混凝土钢筋 腐蚀状态的可靠性研究

王彦明¹, 徐宗顺¹, 刘克², 王弘扬¹

(1. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 日照港建设监理有限公司, 山东 日照 276826)

摘要: 介绍了混凝土中钢筋腐蚀机理与半电池电位法检测钢筋腐蚀状态的原理, 结合日照港煤码头各泊位的检测数据, 根据钢筋锈蚀的理论概率公式, 通过试验与理论分析, 验证了半电池电位法的可靠性, 结果表明计算值与试验检测结论吻合较好。为提高海洋环境下混凝土构件的耐久性, 建议严格限制氯离子的初始含量; 运行管理阶段加强定期安全监测维护。

关键词: 半电池电位; 钢筋锈蚀; 海洋环境; 氯离子扩散系数; 临界保护层厚度

中图分类号: U654 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-7874(2017)12-0015-04

doi: 10.7640/zggwjs201712004

Reliability research of evaluating the reinforcement corrosion state in harbor concrete structures by half cell potential method

WANG Yan-ming¹, XU Zong-shun¹, LIU Ke², WANG Hong-yang¹

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

2. Rizhao Port Construction Supervision Co., Ltd., Rizhao, Shandong 276826, China)

Abstract: We introduced the reinforcement corrosion mechanism in reinforced concrete and the principle of testing by half cell potential method. Based on each berths' test data in Rizhao Port and theoretical probability formula of steel corrosion, we confirmed the reliability of half cell potential method by experiment and theoretical analysis. The results show that the calculated values are in good agreement with the test data. To improve the durability, it's necessary for concrete members in marine environment to limit the initial content of chloride ion. Besides, regular security monitoring and maintenance on operation management stages should be strengthened.

Key words: half cell potential; reinforcement corrosion; marine environment; chloride diffusivity; critical cover thickness

0 引言

长期以来, 国内外海洋工程结构因诸多因素而缩短使用寿命的例子数不胜数, 因此, 加强定期的检测与维护具有很重要的实际意义。在对海港混凝土构件进行腐蚀检测时, 要求尽可能采取无损方法推测内部的腐蚀情况, 半电池电位法因其操作简单, 有较好的工程应用, 但该方法检测

结果的可靠性如何还鲜有理论分析和验证。本文拟通过对海港码头进行钢筋腐蚀电位与抗氯离子扩散性能的试验检测, 结合由 Fick 第二定律推出的钢筋腐蚀概率公式, 通过试验与理论分析评价用半电池电位法检测钢筋腐蚀状态的可靠性, 并提出海洋环境下预防混凝土构件钢筋腐蚀的合理化建议。

1 钢筋锈蚀与半电池电位法原理

混凝土中钢筋发生腐蚀的前提即为钝化膜的破坏, 其原因主要是碳化作用及氯离子的侵蚀。由于微观影响^[1], 氯离子侵蚀效应要远强于碳化

收稿日期: 2017-07-08 修回日期: 2017-08-28

基金项目: 日照港科技计划项目 (SBJS-09-KJ005)

作者简介: 王彦明 (1968—), 男, 山东临沂人, 博士, 教授, 主要从事混凝土耐久性方面研究。E-mail: wangyanming6@163.com

作用。

钢筋发生腐蚀时,其接触面上会发生电荷交换,产生电流并发生极化。在极化过程中,阳极电位升高,阴极电位降低,最终达到一个平衡电位,即腐蚀电位。混凝土和钢筋的电学活性可看作半个弱电池组,分别作为电解质和电极。利用Cu-CuSO₄饱和溶液组成的半电池组与其形成一个全电池系统^[2],由于前者电位稳定,钢筋的半电池电位能够引起全电池电位变化,这就是半电池电位法检测钢筋腐蚀状态的原理。

混凝土中钢筋的活化区与钝化区显示出的腐蚀电位不同,活化区表面钝化膜遭到破坏,阳极极化受阻,钢筋失电子不受限制,故腐蚀电位降低,电位偏负;在钝化区由于钝化膜的存在,阳极失电子能力降低,阳极极化率大,电位偏高。

2 试验概况与结果

日照港始建于1982年,1986年投入使用。码头的主体工程采用重力式工形块结构形式,堵头堤、码头根部混合堤采用水上抛石,根部混合堤及堵头堤胸墙为浆砌石结构,水泥材料系日本进口。试验检测对象为日照港煤码头的北一泊位等27个泊位,主要检测构件为胸墙和工形块,包括胸墙247片,工形块251个,现浇支座梁和预应力板梁各8根。其中,北一泊位设计吨级为0.5万吨级,码头长度185 m,宽度34 m,泊位设计水深-6.0 m;港池设计水深-5.5 m。北一泊位胸墙构件混凝土强度等级为C25,保护层厚度设计值为60 mm;工形块强度等级为C30,保护层厚度设计值为50 mm。

2.1 钢筋半电池电位检测方法与结果

检测仪器选用钢筋锈蚀测定仪,测定仪型号CANIN⁺,量程为0~999 mV,精度为1 mV。在待测部位布置网格测点,测点纵、横向间距为100~300 mm。具体试验方法按照JGJ/T 152—2008《混凝土中钢筋检测技术规程》执行。

检测得到27个泊位上各胸墙、工形块、现浇支座梁和预应力板的电位数据,试验数据表明各泊位构件的半电池电位变化范围基本相同,都在-200~-100 mV之间波动。以北一泊位为代表,该泊位检测构件包括胸墙10片,工形块10个,每1片(个)包含30个测量点。

胸墙和工形块各有300个腐蚀电位测值,按其大小进行分组,10个为1组,取平均值作为代

表值,作累积频率图(如图1所示)。

$$f_x = \frac{r}{\sum n + 1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: f_x 为腐蚀电位检测值的累积频率,%; r 为各半电池电位的排序; $\sum n$ 为总测值的个数。

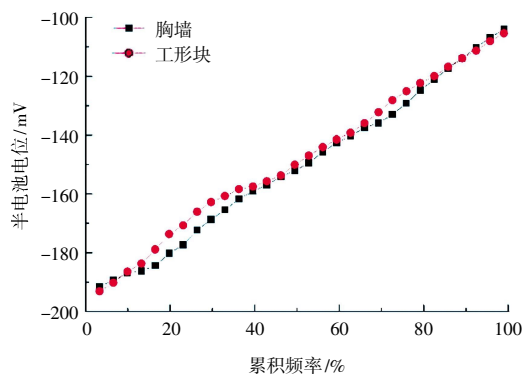


图1 北一泊位胸墙、工形块构件电位累积频率图

Fig. 1 Electric potential cumulative frequency of parapets and modular blocks in North 1 berth

图1表明,测点的半电池电位分布在-200~-100 mV,根据GB/T 50344—2004《建筑结构检测技术规范》关于半电池电位对钢筋锈蚀状态的判别标准,可认为该泊位的钢筋无锈蚀活动性或锈蚀活动性不确定,发生锈蚀的概率仅为5%。北一泊位的测量结果具有代表性,所有泊位测点的测量结果均未低于-200 mV,因此,可以推测27个泊位钢筋锈蚀活动微弱或基本不存在锈蚀问题。

2.2 混凝土抗氯离子渗透性能检测结果

目前,电通量法是反映氯离子渗透能力的主要检测方法^[3-4],其原理是在直流电压作用下,氯离子能通过混凝土试件向正极方向移动,通过测量流过混凝土的电荷量反映渗透混凝土的氯离子量。本次试验方法按照JTJ 275—2000《海港工程混凝土结构防腐技术规范》执行。通过试验检测得到各构件通过的电荷量,部分数据见表1、表2。

表1 胸墙构件抗氯离子渗透性能检测

Table 1 Anti-chloride permeability performance detection of parapets

构件编号	通过电量/C			平均值/C
	1	2	3	
1号胸墙	941	905	936	927
2号胸墙	874	880	862	872
3号胸墙	907	916	930	918

表 2 工形块构件抗氯离子渗透性能检测

Table 2 Anti-chloride permeability performance detection of modular blocks

构件编号	通过电量/C			平均值/C
	1	2	3	
1 号工形块	802	835	817	818
2 号工形块	849	860	831	847
3 号工形块	902	882	914	899

根据 JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》规定, 处于浪溅区混凝土抗氯离子渗透性不应大于 2 000 C, 因此, 判定所测胸墙和工形块构件的混凝土抗氯离子渗透性能较高, 符合规范要求。

2.3 混凝土保护层厚度检测结果

各构件的保护层厚度范围基本一致。以北一泊位为例, 胸墙和工形块构件进行钢筋保护层厚度检测, 共选取胸墙和工形块各 5 个, 每个构件选取 6 根主筋, 在其有代表性的部位各选取 3 个点测量, 检测结果见图 2、图 3。其中, 工形块构件测值比胸墙整体偏低是因保护层厚度设计值原本相差 10 mm。

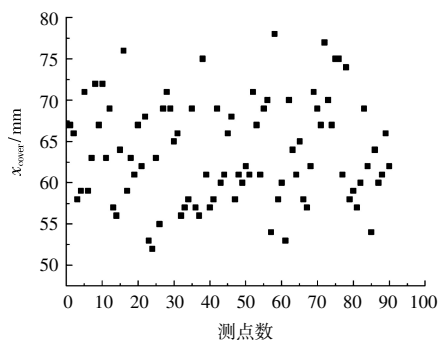


图 2 北一泊位胸墙保护层厚度检测结果

Fig. 2 Cover thickness detection results of parapets in North 1 berth

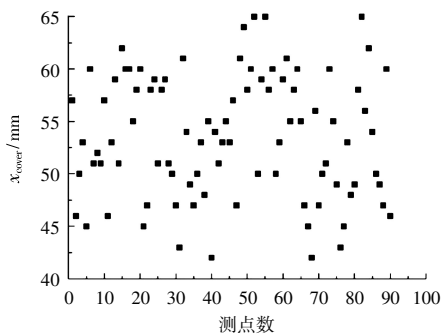


图 3 北一泊位工形块保护层厚度检测结果

Fig. 3 Cover thickness detection results of modular blocks in North 1 berth

3 钢筋锈蚀的理论概率模型

海洋环境下, 当混凝土的均匀性和碳化深度都满足要求时, 氯离子侵蚀程度就成为钢筋锈蚀的最主要因素^[5]。因此, 钢筋发生锈蚀的前提条件可认为是其接触面混凝土中氯离子质量分数达到引起钢筋锈蚀的临界值, 所以, 钢筋锈蚀的概率即为前者小于或等于后者的概率。

$$P_f = P\{x_{\text{cover}} - x_{\text{cr}} \leq 0\} \quad (2)$$

式中: x_{cover} 为混凝土保护层厚度, mm; x_{cr} 为氯离子质量分数达到钢筋锈蚀临界值的混凝土保护层厚度, mm, 两者均服从正态分布。根据临界保护层的理论计算结果, 与实际保护层厚度检测值比较, 即可获得钢筋锈蚀的理论概率, 与半电池电位法检测结果进行对比, 如果吻合, 即可证明半电池电位法在理论上的可靠性。

$$x_{\text{cr}} = 2\sqrt{D_a t} \cdot \text{erf}^{-1}\left(\frac{C_s - C_{\text{cr}}}{C_s - C_0}\right) \quad (3)$$

文献[6]给出临界保护层厚度计算公式(3)。式中, C_s 、 C_0 、 C_{cr} 分别为混凝土材料表面、初始、临界氯离子质量分数; D_a 为混凝土材料表观扩散系数。

文献[7]通过对 15 种不同胶凝材配合比的混凝土进行拟合, 发现对于抗氯离子渗透性能高的混凝土, 电通量和氯离子扩散系数存在着较为理想的线性关系, 可由经验公式近似计算 D_a :

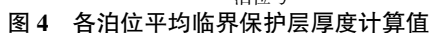
$$D_a = \frac{Q_c + 1\,328.994\,57}{32.959\,09} \quad (4)$$

式中: Q_c 为混凝土电通量。根据检测所得数据, D_a 的计算结果区间为 $(65 \sim 80) \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

日照港建设初期, 对水泥品种及施工质量进行了严格把关, 混凝土氯离子初始含量低于 0.005%, 因此, C_0 可近似取值为 0。混凝土表面氯离子质量分数 C_s 对于混凝土结构而言并不稳定, 其值因水位高低、季节不同而变化, 根据赵羽习等^[8]对其变化规律的总结, C_s 会在每年 6 月份到 8 月份之间达到峰值, 结合检测泊位的水位, 取 C_s 为 1.2% 的近似稳定值。对于混凝土使用寿命预测及耐久性而言, C_{cr} 取值应为 0.20%~0.38%, 在此取 0.32%。

4 计算结果与分析

根据式(3)计算得到各泊位上构件的平均临界保护层厚度值, 见图 4。东二泊位出现最高值 46 mm, 东四、东六、东七泊位结果为 44 mm, 剩余 22 个泊位的临界值都在 43 mm 以下。



1) 日照港煤码头浪溅区构件半电池电位检测结果在 $-200 \sim -100$ mV 内, 腐蚀概率小于 5%, 临界保护层厚度计算结果基本低于实测值, 二者结

- [1] 宋学锋,张县云,高瑞. 碳化及氯离子交互作用下混凝土内钢筋的锈蚀行为[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 892-895.
SONG Xue-feng, ZHANG Xian-yun, GAO Rui. Corrosion behavior of steel embedded in concrete under interaction of carbonation and chloride ion[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 892-895.
- [2] 满志强. 半电池电位法在水工混凝土钢筋锈蚀检测中的应用[J]. 广西水利水电, 2014(6): 92-96.
MAN Zhi-qiang. Application of half-cell potential method in hydraulic concrete reinforcing steel rust inspection [J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2014(6): 92-96.
- [3] 叶其业,杜乃红,张珩瑜. 混凝土氯离子渗透试验研究[J]. 中国港湾建设, 2011(4): 33-41.
YE Qi-ye, DU Nai-hong, ZHANG Heng-yu. Experimental study on chloride ion penetration performance of concrete[J]. China Harbour Engineering, 2011(4): 33-41.
- [4] 杨建军,李俊毅,雷周,等. 混凝土电通量的影响因素分析[J]. 中国港湾建设, 2012(4): 57-61.
YANG Jian-jun, LI Jun-yi, LEI Zhou, et al. Analysis on affecting factors of concrete electric flux[J]. China Harbour Engineering, 2012(4): 57-61.
- [5] ALONSO C, ANDRADE C, CASTELLOTE M, et al. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar[J]. Cement & Concrete Research, 2000, 30(7): 1 047-1 055.
- [6] 王甲春,閔培渝. 海洋环境下钢筋混凝土中钢筋锈蚀的概率[J]. 吉林大学学报:工学版, 2014, 44(2): 352-357.
WANG Jia-chun, YAN Pei-yu. Probabilistic analysis of rebar rust in concrete under marine environment[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2014, 44(2): 352-357.
- [7] 王海彦. 胶凝材电通量和氯离子扩散系数之间关系研究[J]. 混凝土, 2013(1): 44-47.
WANG Hai-yan. Research on the relationship between cementing material electric flux and chloride diffusion coefficient[J]. Concrete, 2013(1): 44-47.
- [8] 赵羽习,高祥杰,许晨,等. 海港码头混凝土表面氯离子质量分数随季节变化规律[J]. 浙江大学学报:工学版, 2009, 43(11): 2 120-2 124.
ZHAO Yu-xi, GAO Xiang-jie, XU Chen, et al. Concrete surface chloride ion concentration varying with seasons in marine environment[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009, 43(11): 2 120-2 124.
- [9] 杨红超. 黄骅港混凝土结构实体氯离子渗透性和强度的关系[J]. 中国港湾建设, 2011(4): 47-48.
YANG Hong-chao. Relationship between chloride permeability of concrete mass and its strength[J]. China Harbour Engineering, 2011(4): 47-48.