



基于电化学综合法的 混凝土中钢筋锈蚀检测与评价

吉同元, 丁国庆, 徐亮, 秦网根

(江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏省水运工程技术研究中心, 江苏南京 210014)

摘要: 通过室内试验和工程实际应用, 研究了基于电化学综合法的混凝土结构中钢筋锈蚀检测与评价技术。首先通过3组试件试验研究不同腐蚀条件、不同测试条件对混凝土电阻率、半电池电位和腐蚀电流密度3种电化学检测结果的影响规律, 得到电化学综合法检测混凝土中钢筋锈蚀状况的递进式评定准则。以某高桩码头检测项目为依托, 采用电化学综合法对混凝土中钢筋锈蚀状况进行检测, 并根据该递进式评定准则对钢筋锈蚀情况进行综合评价。结果表明, 基于电化学综合法的混凝土中钢筋锈蚀检测与评价技术可有效提高钢筋锈蚀状况检测的准确性和可靠性。

关键词: 混凝土电阻率; 半电池电位; 腐蚀电流密度; 电化学综合法; 递进式评定准则

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0007-06

Detection and evaluation of reinforcement corrosion in concrete by electrochemical synthesis method

Ji Tong-yuan, Ding Guo-qing, Xu Liang, Qin Wang-gen

(Aquatic Transportation Center of Jiangsu Province, Jiangsu Province Communications Planning and Design Institute Co., Ltd.,
Nanjing 210014, China)

Abstract: Through laboratory test and practical engineering application, the technique of testing and evaluating the reinforcement corrosion in concrete structure was studied based on the electrochemical synthesis method. The paper studied the rule of the impact on three electrochemical detection results of concrete resistivity, half-cell potential and corrosion current density by different corrosion conditions and test conditions through three groups of specimen tests and obtained a progressive assessment criteria to detect the state of reinforcement corrosion in concrete with the electrochemical synthesis method. It regarded the test item of a high-pile wharf as the research object, and detected the state of reinforcement corrosion in concrete with electrochemical synthesis method and comprehensively evaluated the situation of reinforcement corrosion according to progressive assessment criteria. The results show that the technique of testing and evaluating the reinforcement corrosion in concrete with the electrochemical synthesis method can effectively improve the accuracy and reliability in detecting the situation of reinforcement corrosion.

Keywords: concrete resistivity; half-cell potential; corrosion current density; electrochemical synthesis method; progressive assessment criteria

钢筋锈蚀会引起结构耐久性不足而提前失效, 达不到设计服役年限即发生破坏, 特别是沿海及

近海地区的海港码头采用接岸式的高桩码头结构, 因通风条件差、水汽易聚积、未采取有效透气措

收稿日期: 2016-03-23

作者简介: 吉同元 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程、岩土工程的检测、评估、科研及咨询工作。

施等,使得此类结构由钢筋锈蚀引起的耐久性问题特别突出,因海洋环境作用导致钢筋锈蚀而使结构发生早期破坏的情况尤为严重,“短命”工程现象已引起了国内外工程界的高度重视。

本文首先介绍混凝土电阻率法、半电池电位法、腐蚀电流密度法3种电化学方法的检测原理,然后通过室内试验,研究不同腐蚀条件、不同测试条件对混凝土电阻率、腐蚀电位和腐蚀电流密度3种电化学检测结果的影响规律,建立基于电化学检测结果的钢筋锈蚀递进式评判准则,并将该方法和评价准则应用于实际工程中。

1 电化学测试方法原理

电化学检测方法是反映钢筋锈蚀本质过程的一种有效测量方法,电化学检测方法众多,目前常用的电化学方法主要有混凝土电阻率法、半电池电位法和腐蚀电流密度法^[1]。

1.1 电阻率法

混凝土电阻率是截面积为 A 的混凝土在单位长度 L 上所具有的电阻值^[2],用 ρ 表示

$$\rho = AR/L \quad (1)$$

即在已知尺寸的试件施加一定的电压,测量流经试件的电流,算出电阻和电阻率。电阻率法在一定程度上能够反映钢筋的锈蚀程度,且操作简单、方便,但不能定量描述,应用范围有一定的局限性^[3]。

1.2 半电池电位法

半电池电位法(half-cell potential),是目前无损检测钢筋腐蚀状态的一种常用方法,是通过测量结构中钢筋的自然腐蚀电位评价钢筋的锈蚀状况的一种方法^[4-5],钢筋腐蚀电位检测示意图1,腐蚀电流检测示意图2。

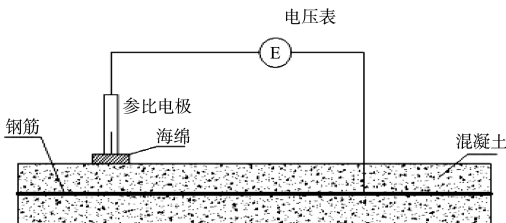
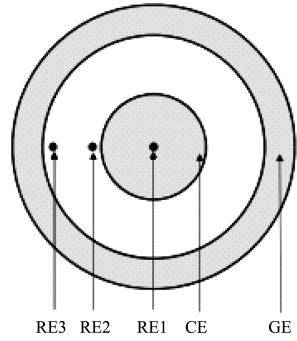
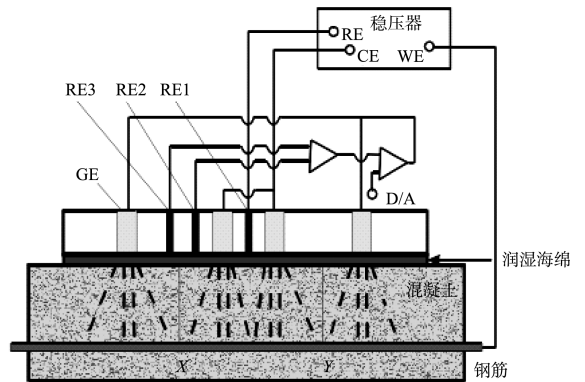


图1 钢筋腐蚀电位检测示意



a) 护环电极



b) 腐蚀电流法测量系统原理

注: CE:辅助电极; GE:护环电极; RE1~3:Cu/饱和CuSO₄参比电极; WE:工作电极。

图2 腐蚀电流法测量示意图

1.3 腐蚀电流密度法

根据腐蚀电化学理论^[6],在自然腐蚀电位附近(一般过电位 $\eta < 10$ mV),测得的电位电流在对数关系图上具有近似的线性关系。Stern于1957年按此关系推导出检测钢筋锈蚀速率的一个简单、快速、无损的技术——线性极化法。为克服极化区域不均匀的问题,Feliu提出了护环电极技术,通过附加辅助电极使钢筋极化区域局限于一个已知区域,具体装置见图2。

2 试验设计

试件配合比见表1。试件尺寸为200 mm×200 mm×600 mm,见图3。试件养护条件与试验条件见表2。

表1 混凝土配合比

配合比	水胶比	外掺剂		水泥用量/ (kg/m ³)	抗压强度/MPa	
		型号	掺量/%		7 d	28 d
1:2.74:3.78	0.56	PCA-I	1.6	280	32.8	46.4

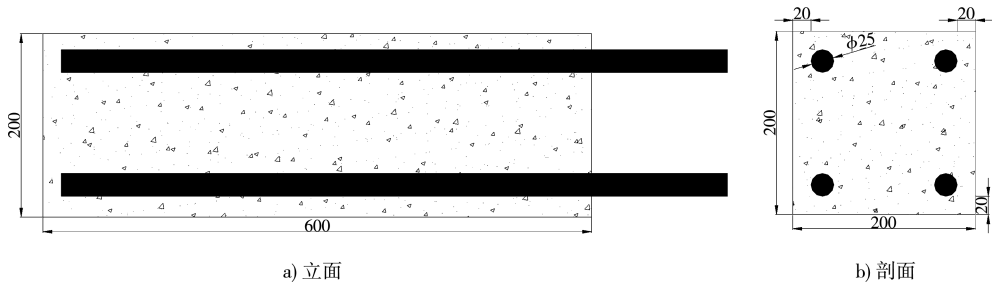


图 3 试件尺寸 (单位: mm)

表 2 试件养护条件与试验条件

编号	数量(组)	养护条件	试验条件
M1-1	1	标准养护 28 d 后置于室外露天自然养护以模拟大气环境下的自然碳化过程	在构件表面喷淋养护 0、10、15、20、25 min 时开始进行电化学试验
M1-2	1	标准养护 28 d 后长期浸泡水中养护	试件从水中取出后擦干, 开始进行电化学试验
M2-1	1	室内标准养护 28 d 后烘干, 然后将试块置于质量分数为 10% 的 NaCl 溶液中浸泡 7 d、高温高湿养护 7 d 后再烘干的循环方法, 以模拟濒海环境下混凝土结构中钢筋的腐蚀过程	在构件表面喷淋养护 0、10、15、20、25 min 时开始进行电化学试验

3 试验研究

3.1 外观调查结果

试件 M1-1、M1-2 构件外观完好, 钢筋表面只有少量锈迹, 初步判断构件内部钢筋未出现锈蚀; 试件 M2-1 构件钢筋表面存在明显锈斑, 初步判断构件内部钢筋可能出现锈蚀, 但混凝土表面未出现裂缝或保护层混凝土脱落现象。

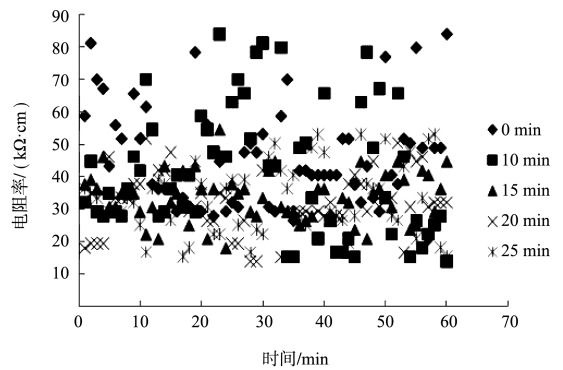
3.2 电化学试验结果

3.2.1 电阻率试验结果

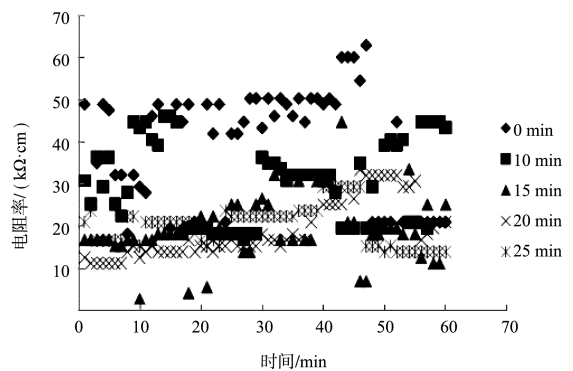
表 3 为试件 M1-1、M1-2 和 M2-1 混凝土电阻率特征值, 图 4 为试件 M1-1、M2-1 混凝土电阻率散点。

表 3 试件电阻率特征值

编号	养护时间/ min	电阻率/(kΩ·cm)		
		最小值	平均值	最大值
M1-1	0	21.0	46.4	84.0
	10	14.0	41.7	84.0
	15	16.8	33.6	54.6
	20	14.0	32.5	54.6
	25	15.4	33.6	53.2
M1-2	25	2.8	19.6	36.4
M2-1	0	18.2	39.0	63.0
	10	16.8	30.2	46.2
	15	2.8	19.7	44.8
	20	11.2	19.8	33.6
	25	14.0	20.3	29.4



a) 试件M1-1



b) 试件M2-1

图 4 试件混凝土电阻率散点

从表 3 和图 4 可知, 试件 M1-1、M1-2 和 M2-1 在喷淋 10 min 内混凝土电阻率值均较离散、波动范围大、稳定性较差, 在喷淋后 15~25 min 内混

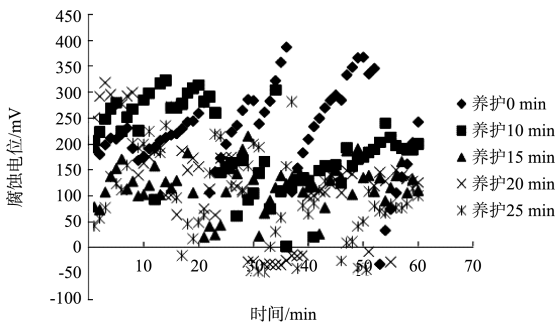
凝土电阻率值较为稳定,但存在个别异常值。对部分电阻率异常高的区域局部破损检查发现存在较大的粗骨料,因粗骨料基本都是绝缘体,从而导致实测电阻率偏高,因此现场检测不宜在构件受到雨淋、潮涨潮落海水浸泡短时间内测量,也不宜在用水喷淋混凝土表面后立即检测,应至少持续喷淋 15 min 后开始检测,确保数据稳定、可靠。试件 M1-2 混凝土电阻率最小值和平均值整体均低于试件 M1-1 和 M2-1,因此对于长期受水浸泡的饱水混凝土构件,单一用混凝土电阻率法评定钢筋锈蚀状易引起误判,尤其是在临界点附近更易引起误判。

3.2.2 腐蚀电位试验结果

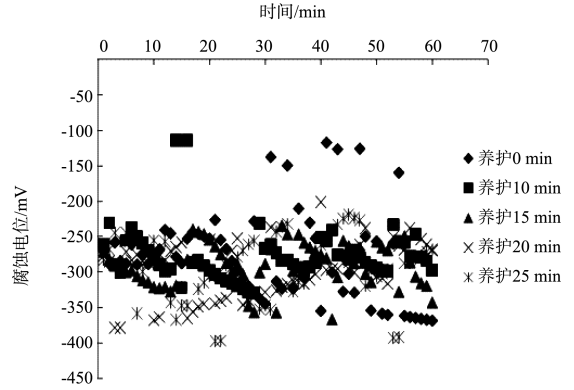
表 4 为试件 M1-1、M1-2 和 M2-1 腐蚀电位特征值,图 5 为试件 M1-1、M2-1 腐蚀电位散点。

表 4 试件腐蚀电位特征值 (Ag/AgCl)

编号	养护时间/min	电位特征值/mV		
		最小值	平均值	最大值
M1-1	0	-32	225	386
	10	2.4	195	323
	15	-45	118	276
	20	-40	114	319
	25	-47	107	281
M1-2	25	-327	-281	-200
M2-1	0	-368	-276	-117
	10	-329	-275	-114
	15	-366	-290	-233
	20	-378	-296	-200
	25	-397	-291	-218



a) 试件M1-1



b) 试件M2-1

图 5 试件腐蚀电位散点

从表 4 和图 5 可知,试件 M1-1、M1-2 和 M2-1 在喷淋后 15 min 内,试验数据整体波动范围较大,试验测试的后期腐蚀电位存在逐渐升高的趋势,分析原因应为混凝土表面失水造成的,后经多喷淋验证了该判断;15 min 后试验数据整体较为稳定,数据整体波动范围较小,试件 M1-2 腐蚀电位平均值、最大值和最小值整体均低于 M1-1 和 M2-1。因此现场检测不宜在用水喷淋混凝土表面后立即检测,应至少持续喷淋 15 min 后开始检测,确保数据稳定、可靠。

3.2.3 腐蚀电流密度试验结果

表 5 为试件 M1-1、M1-2 和 M2-1 腐蚀电流密度特征值,图 6 为试件 M1-1、M2-1 腐蚀电流密度散点。

表 5 试件混凝土腐蚀电流密度特征值

编号	养护时间/min	电流密度特征值/($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)		
		最小值	平均值	最大值
M1-1	0	0.68	1.68	3.19
	10	1.00	2.03	3.90
	15	0.49	1.44	2.44
	20	0.43	2.07	3.94
	25	0.60	1.48	4.39
M1-2	25	0.06	1.89	5.19
M2-1	0	2.19	5.31	9.29
	10	2.07	5.45	7.96
	15	2.13	5.11	7.70
	20	2.76	5.37	6.77
	25	2.94	5.26	7.64

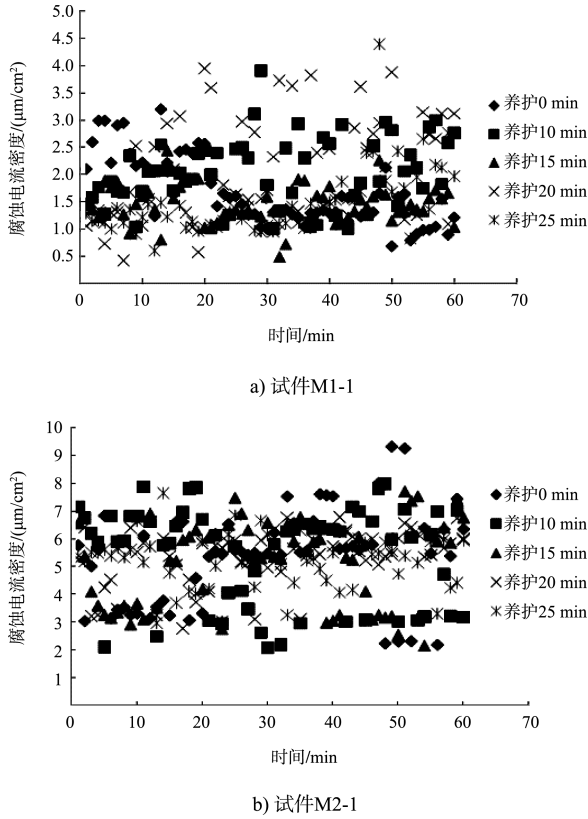


图 6 试件腐蚀电流密度散点

对于个别异常数值, 分析可能的原因主要有护环电极未能完全有效补偿辅助电极与钢筋网络之间的非均匀电流弥散, 钢筋极化面积计算不准确, 同时因混凝土是高阻抗不均匀体系, 在过电位和极化电流都很小的情况下, 混凝土孔隙液欧姆压降引起的误差较大, 进而对测试结果产生一定影响。

表 6 试件中钢筋锈蚀状况评判结果

编号	电化学方法检测			破损检测
	W 混凝土电阻率法	半电池电位法	密度电流密度法	
M1-1	钢筋活化时, 可出现中高锈蚀速率	钢筋发生锈蚀的概率小于 90%	高锈蚀速率	未锈蚀
M2-1	钢筋活化时, 可出现中高锈蚀速率	钢筋发生锈蚀的概率大于 90%	高锈蚀速率	已锈蚀
M1-2	钢筋活化时, 可出现中高锈蚀速率	钢筋发生锈蚀的概率大于 90%	高锈蚀速率	未锈蚀

注: 混凝土电阻率、腐蚀电流密度评定标准采用 GB/T 50784—2013《混凝土结构现场检测技术规范》; 腐蚀电位评定标准采用 JTJ 302—2006《港口水工建筑物检测与评估技术规范》。

综上所述, 采用单一的电化学评价方法均存在一定的局限性, 张贺^[7]采用 3 种电化学方法, 分别对不同水灰比、不同保护层厚度的混凝土试件中钢筋的锈蚀状况进行测试, 通过理论分析和微观验证, 实验室中得到了判定钢筋锈蚀的 3 种电化学参数临界值, 但实际工程中因钢筋极化面

3.2.4 试验结果分析

根据上述试验结果, 分别采用单一电化学方法, 根据规范中钢筋锈蚀状况评判标准对试件中钢筋锈蚀状况进行评判, 同时对试件进行破损检测, 结果见表 6。

试件 M1-1 中钢筋状态与 3 种电化学方法检测结果不一致; 试件 M2-1 中钢筋状态与 3 种电化学检测方法一致, 匹配程度较好; 试件 M1-2 中钢筋状态与 3 种电化学方法检测结果不一致。分析原因主要在于电阻率法只能提供探头区域特定位置的钢筋锈蚀几率, 无法定性和定量反映试件中整根钢筋的锈蚀情况, 且影响混凝土电阻率测试结果的因素众多, 半电池电位法在评定钢筋腐蚀状态时存在一定的不确定区间, 对评价钢筋锈蚀程度带来一定困难, 腐蚀电流密度反映的是整根钢筋的平均锈蚀速率, 而在实际腐蚀进程中, 钢筋的锈蚀往往是从某个局部开始, 因此腐蚀电流密度法的测试结果可能偏于保守, 无法判断钢筋早期锈蚀的情况, 尤其对钢筋开始锈蚀的临界点判断不够准确。对于长期浸泡水中饱水的钢筋混凝土构件, 因阴极氧气含量低和难以透过混凝土扩散到钢筋表面, 使钢筋腐蚀阴极反应受阻, 钢筋混凝土界面电子高度富集, 电位可达到非常低的水平, 使得评判结果出现误判。

积难以准确计算导致钢筋腐蚀电流密度临界值不够准确, Thomas Frolund 于 2002 年通过对钢筋腐蚀电流密度的研究, 定量给出了基于腐蚀电流密度的钢筋锈蚀速率评定标准, 但未能有效结合混凝土电阻率法和腐蚀电位法, 本文通过试验研究和对工程实际检测数据的统计分析, 结合张贺和

Thomas Frolund 的研究结果, 给出了联合混凝土电阻率、半电池电位和腐蚀电流密度 3 种电化学综合检测技术的混凝土结构中钢筋锈蚀状况递进式评判准则 (with GalvaPulse instrument), 见表 7。

表 7 混凝土结构中钢筋锈蚀状况递进式判断准则 (Ag/AgCl)

电化学参数		钢筋锈蚀状况
$R \geq 20 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$		没有锈蚀
$E > -9 \text{ mV}$		没有锈蚀
$I_{\text{corr}} < 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$		可以忽略
$RC < 20 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$	$2 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \leq I_{\text{corr}} < 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	低锈蚀速率
	$5 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \leq I_{\text{corr}} < 15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	中等锈蚀速率
	$I_{\text{corr}} \geq 15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	高锈蚀速率

根据表 7 递进式评判准则, 试件 M1-1 中钢筋没有锈蚀、M1-2 中钢筋腐蚀速率可以忽略, M2-1 中钢筋处于中等腐蚀速率, 评判结果与实际情况较为吻合。

4 工程应用

4.1 工程概况

某码头工程于 1998 年开工建设, 2005 年投产运营, 采用高桩梁板式结构, 设计船型为 5 000 吨级。码头长 269.0 m、宽 35.0 m, 基桩采用 $\phi 800\text{PHC}$ 管桩。

4.2 检测结果与分析

在横梁侧面布置测试网格, 网格间距 250 mm \times 400 mm, 测试面积为 1.3 m \times 4.7 m, 测区及测点布置见图 7。

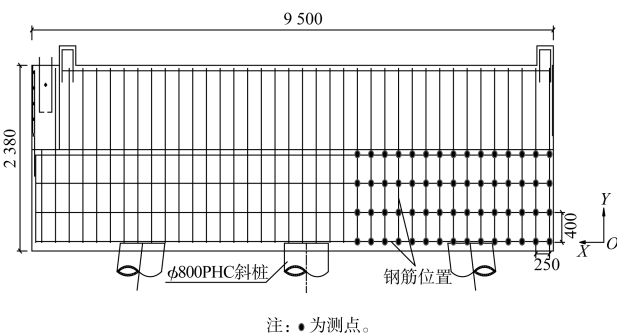


图 7 横梁测区及测点布置 (单位: mm)

4.2.1 外观调查检测结果

外观调查检测表明, 构件混凝土表面局部区域存在混凝土破损、钢筋外露, 且已存在锈蚀痕迹, 初步判断横梁内部钢筋已出现锈蚀, 外观调

查照片见图 8。



图 8 横梁中钢筋锈胀劣化照片

4.2.2 电化学检测结果

图 9 为横梁混凝土电阻率、腐蚀电位、腐蚀电流密度测试结果云图。

从图 9 可以看出, 测试区域混凝土电阻率值均较低, 测试区域内钢筋均存在锈蚀可能, 腐蚀电位云图也显示存在多处阳极区即电位梯度较大的位置, 与腐蚀电流密度云图显示结果基本吻合。同时根据本文给出的混凝土中钢筋锈蚀状况递进式判别准则, 目前混凝土中钢筋锈蚀状态为中等锈蚀速率, 现场构件表面亦存在明显的溢锈现象。

