

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.012



电化学除氯过程钢筋网周围电场与氯离子分布特征试验研究

杨超¹, 毛江鸿², 孙洋³, 王银辉², 朱焱锋^{1,2}, 沈建生²

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074;

2. 浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100; 3. 大榭大桥有限公司, 浙江 宁波 315812)

摘要: 探明电化学除氯过程混凝土内部的电场分布特征有利于研究混凝土除氯后的氯离子非均匀分布现象。为进一步研究电化学除氯过程中混凝土内部电场对氯离子迁出的影响, 将一种屏蔽式预埋电极阵列应用于内蕴氯盐的钢筋网布置混凝土试件电化学除氯试验中, 探究钢筋网周围电场及氯离子的分布特征。结果表明, 混凝土内电场分布影响氯离子的迁出, 电场强度大的区域, 氯离子迁出速率高, 残余氯离子浓度低; 电场强度小的区域, 氯离子迁出速率低, 氯离子存在堆积现象。

关键词: 混凝土; 耐久性; 电化学除氯; 电场分布; 氯离子

中图分类号: TU528.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)03-0081-05

Experimental analysis on distribution characteristics of chloride and electric field around reinforcement nets during electrochemical chloride extraction

Yang Chao¹, Mao Jianghong², Sun Yang³, Wang Yinhui², Zhu Yaofeng^{1,2}, Shen Jiانشeng²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang, P. R. China; 3. Daxie Bridge Co., Ltd., Ningbo 315812, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: It is helpful to investigate the non-uniform distribution of chloride after electrochemical chloride extraction by ascertaining the distribution characteristics of electric field during electrochemical chloride extraction. In order to study the effect of electric field on the migration of chloride ions, a shielded buried electrode array was used to ascertain the distribution characteristics of chloride and electric field around reinforcement nets. The results show that the electric field in concrete affects the migration of chloride ions, when a region with strong electric field, chloride ion migration rate is high, residual chloride ion concentration is low, when a region with week electric field, chloride ion migration rate is low residual chloride ion concentration is high.

收稿日期: 2017-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(51408544、51638013、51578490); 国家科技支撑计划(2015BAL02B03); 宁波市科技惠民项目(2016C51024); 宁波市自然科学基金(2016A610215)

作者简介: 杨超(1992-), 男, 主要从事钢筋混凝土结构耐久性研究, E-mail: 15320476570@163.com。

毛江鸿(通信作者), 男, 副教授, E-mail: jhmao@nit.zju.edu.cn。

Received: 2017-06-28

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51408544, 51638013, 51578490); National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (No. 2015BAL02B03); Science Technology "Huimin" Project of Ningbo (No. 2016C51024); Natural Science Foundation of Ningbo (No. 2016A610215)

Author brief: Yang Chao (1992-), main research interest: durability of reinforced concrete, E-mail: 15320476570@163.com. Mao Jianghong (corresponding author), associate professor, E-mail: jhmao@nit.zju.edu.cn.

Keywords: concrete; durability; electrochemical chloride extraction; electric field distribution; chloride

钢筋锈蚀是危害混凝土结构耐久性的主要原因之一,氯盐侵蚀是引起钢筋锈蚀的最主要原因^[1-2]。氯离子进入混凝土的方式主要有外部环境氯离子的渗透、扩散等。相关资料^[3-6]表明,近年来,钢筋混凝土结构的耐久性问题越来越突出。如何对钢筋混凝土结构进行耐久性修复,已成为迫切需要解决的问题。

电化学除氯技术^[7-8]是目前应用较为广泛的一种混凝土耐久性提升技术。该技术采用电化学原理将混凝土内部氯离子排除,实现混凝土结构耐久性提升。相关研究表明,既有混凝土结构耐久性提升过程中存在氯离子非均匀迁出现象。Toumi 等^[9]的试验结果表明,电化学除氯后混凝土中氯离子的分布曲线为上凸弯曲曲线,呈现非均匀现象。祝频等^[10]、郑靛等^[11]的理论模型和实测结果都证实混凝土内部的残余氯离子存在非均匀分布现象。Mao^[12]研究表明,残余氯离子存在非均匀分布现象,氯离子会由高浓度区域向低浓度区域扩散。有学者提出,氯离子非均匀分布跟通电过程中混凝土内部电场有关。郭育霞^[13]认为电化学除氯过程中氯离子在电场中运动,电场强度大的区域,所受的力大,除氯效率越高。Li 等^[14]建立了氯离子入侵混凝土模型,研究电势梯度等因素对电化学除氯的影响。张嘉新等^[15]研究外电场作用下离子的迁移规律,认为距钢筋越近,电场强度越大,残余氯离子浓度越低。Cañón 等^[16]认为,距钢筋近的区域,电场强度大,除氯效率高。

已有研究表明,电化学除氯过程混凝土内部电场对除氯有重要影响。对钢筋周围电场与氯离子分布特征以及内部电场与氯离子电迁移之间的关系目前还没有进行深入研究。笔者将一种屏蔽式预埋电极阵列运用于内蕴氯盐的钢筋网布置试件中,进行电化学除氯试验,探索电化学除氯过程钢筋周围的电场与氯离子分布特征及电场对除氯效果的影响。

1 试验设计与过程

1.1 混凝土试件配合比及尺寸

设计钢筋混凝土试件保护层厚度为 40 mm,尺寸为 90 mm×150 mm×300 mm(高×宽×长)。试件中埋置两根钢筋直径为 10 mm 的 HPB300 圆钢,钢筋中间用两根箍筋连接,形成钢筋网布置。混凝土抗压强度设计为 C30,采用 P. O. 42.5 水泥,水灰比取 0.52。浇筑试件时掺入占水泥质量 3% 的分析

纯氯化钠,石子采用粒径 10 mm 的粗骨料,其配合比如表 1 所示。

表 1 混凝土配合比

Table 1 Mix proportions of concrete

设计强度等级	水灰比	水/ (kg·m ⁻³)	水泥/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	石子/ (kg·m ⁻³)
C30	0.52	213	410	638	1 086

1.2 电化学除氯过程及电场检测

混凝土试件养护 2 d 后拆模,并在养护室标准养护 28 d。养护结束后通电进行电化学除氯试验。试件中钢筋作为阴极连接直流电源的负极,试件底部包裹不锈钢网作为阳极连接直流电源的正极,电解液采用饱和氢氧化钙溶液,试件另外 5 个表面进行环氧树脂密封作为绝缘面,电流密度为 3 A/m²,通电时间为 15 d。

采用一种预埋在钢筋混凝土试件内的屏蔽式电极阵列,用于检测钢筋混凝土试件通电除氯时内部的电场分布。试验中设置 7 排电极构成电极阵列,每排电极有多枚电极探针传感器,以保证能较准确地检测试件中电场分布情况。对每排电极进行编号,位置编号如图 1 所示。

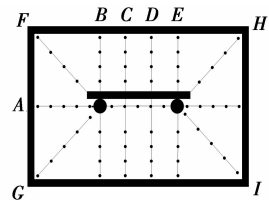


图 1 电极位置编号

Fig. 1 Electrode position number

图 1 中 A 为水平轴电极,B、C、D、E 为竖向布置的电极,各轴均分钢筋之间的长度,F-G 为左边斜向电极,H-I 为右边斜向电极。A 电极探针编号从左到右依次为-7 至 7,B、C、D、E 电极探针编号从下到上依次为-4 至 4,F-G、H-I 电极探针编号从下到上依次为-5 至 5。

通过测量电极阵列上的每个电极电势,描绘电极所在位置的电势分布图,探究电场分布特征。电势梯度可表示电场强度,计算式为

$$E = U/d \quad (1)$$

式中: E 为电势梯度; U 为两探针间的电势差, V ; d 为两探针间的距离, m 。

1.3 电化学除氯后氯离子浓度检测

通电结束后,检测钢筋网配置的混凝土试件的

残余氯离子含量。采用直径 12 mm 的钻头取粉,每隔 5.0 mm 逐层钻取粉末,取至钢筋表面处。为了避免不同深度范围的粉末试样相互影响,在钻取下一个试样前将钻头清理干净,并用吹灰球将孔壁上的粉末吹干净。取粉区共分为 5 个区域,位置及编号如图 2 所示。取粉完成后准确称取 2.0 g 粉末,加以 20.0 g 去离子水于瓶振荡,浸泡 24 h 后用 Chloride-Meter DY-2501 型精密离子计测量水溶液中的氯离子浓度值。

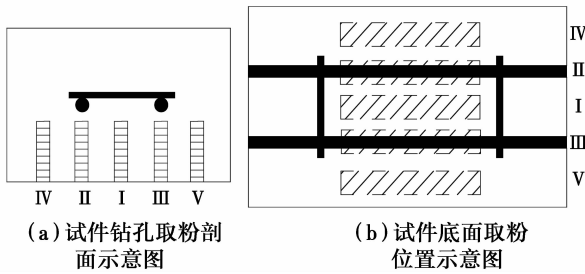


图 2 试件钻孔取粉位置示意图
Fig. 2 Drilling position of component

图 2 中 I 为试件钢筋之间空白区域, II 和 III 分别为试件钢筋正下方区域, IV 和 V 分别为试件边缘区域。每个取粉区域各取 3 个孔。

2 试验结果与分析

2.1 混凝土内部电场分布特征

在通电期间内每天用万能表检测试件的电极电势变化,取通电期间每个电极的电势平均值绘制电势变化图,如图 3 所示。

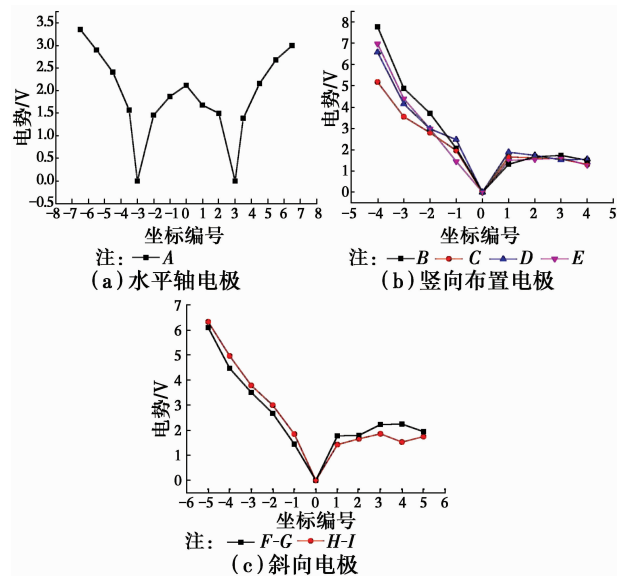


图 3 试件内各电极的电势分布
Fig. 3 Electron distribution of components

钢筋布置于 A 电极-3 坐标及 3 坐标处。从图

3(a)可以看出,A 电极的电势以坐标原点为中心,两边呈对称分布。从电势变化可以看出,钢筋左右侧电场强度相似;电场方向相反,均指向钢筋。图 3 (b)为竖向电极的电势检测结果,从图 3(b)可以看出,竖向电极下半部分电势变化明显,即试件下半部分钢筋以下位置电场强度明显,且电场强度方向指向钢筋处;而竖向电极上半部分电势变化都趋于水平分布,表明试件上半部分即钢筋以上位置电场分布很弱。图 3(c)为斜向电极的电势检测结果,同样可以看出,试件下半部分钢筋以下位置电场强度明显,试件上半部分钢筋以上位置电场分布很弱,电场方向均指向钢筋处。

2.2 混凝土内部残余氯离子分布特征

经过检测,该批试件的混凝土内部初始氯离子浓度占胶凝材料质量的 0.272%。电化学除氯后不同区域的残余氯离子浓度分布如图 4 所示。

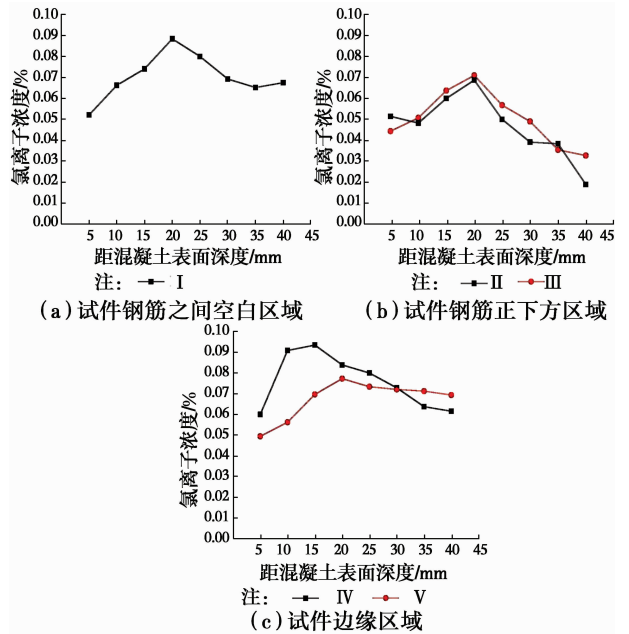


图 4 试件内不同区域氯离子空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of residual chloride

试件残余氯离子浓度在不同区域沿混凝土底面深度方向都有氯离子堆积现象,残余氯离子在沿混凝土底面深度方向呈非均匀分布。从图 4 可以看出,试件各区域氯离子浓度峰值出现在距混凝土表面深度约 20 mm 处,峰值处距钢筋距离约 20 mm,处于电迁路径中间位置。图 4(a)和图 4(c)中整体氯离子浓度高于图 4(b),即边缘区域及钢筋之间空白区域整体氯离子浓度高于钢筋正下方区域,说明在边缘区域及钢筋之间空白区域存在氯离子堆积现象,残余氯离子沿混凝土底面宽度方向呈非均匀分布。由此可见,电化学除氯后混凝土内残余氯离子

空间分布呈现非均匀现象。

2.3 电场分布与氯离子分布的对应关系

混凝土试件保护层内钢筋下方每排电极有4个电极探针,钢筋与下方第一个探针距离10 mm,且每两个探针间距离为10 mm。由于试件内电极左右对称布置,取粉区域I与C下半部分电极空间位置一致,取粉区域II与B下半部分电极空间位置一致,因此,取这两个位置进行分析。根据式(1),绘制电场强度与氯离子分布的对应关系,如图5所示。

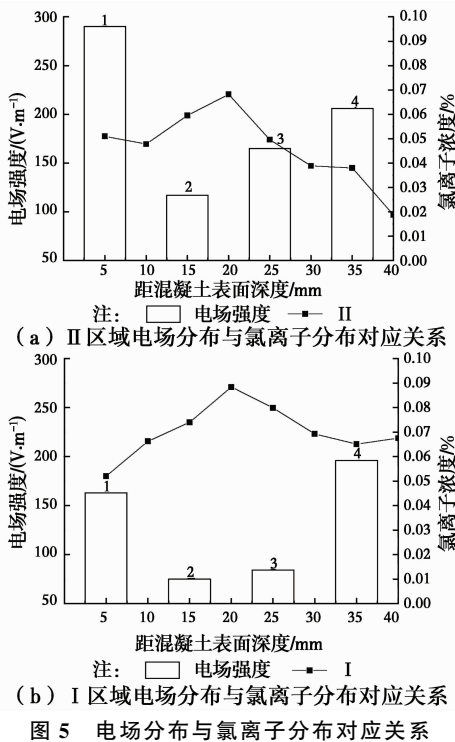


图5 电场分布与氯离子分布对应关系

Fig. 5 Electric field intensity corresponds to chloride distribution

图5中:1为距混凝土表面深度10 mm范围内的电场强度;2为距混凝土表面深度10~20 mm范围内的电场强度;3为距混凝土表面深度20~30 mm范围内的电场强度;4为距混凝土表面深度30~40 mm范围内的电场强度。从图5可以看出,混凝土内残余氯离子分布大致与电场分布呈相反趋势。电场强度大的区域,残余氯离子浓度低;电场强度小的区域,残余氯离子浓度高,电场分布影响混凝土内氯离子分布。靠近钢筋和靠近辅助阳极区域电场强度较大,混凝土保护层内中间位置电场强度较小,所以,电迁路径中间位置出现氯离子堆积现象。图5(a)中II区域整体电场强度较图5(b)中I区域大,其残余氯离子浓度也相对较小,表明电场强度大的区域,残余氯离子浓度低。因此,试件钢筋正下方区域残余氯离子浓度整体较试件中间空白区域和边

缘区域低,混凝土内氯离子在试件底面宽度方向呈现非均匀分布。

3 结论

采用一种屏蔽式预埋电极阵列,进行了内蕴氯盐的钢筋网布置试件电化学除氯过程内部电场与氯离子分布特征的探索性试验,结果表明:

1)通过预埋电极阵列检测钢筋混凝土试件通电过程中的电势空间分布,可稳定得到电极阵列预埋位置处的电势梯度,在混凝土保护层内靠近钢筋和外部辅助阳极区域电场强度大,保护层中间位置电场强度小。

2)混凝土内残余氯离子呈现非均匀分布,证实了氯离子的非均匀电迁现象,同时,混凝土内电场分布影响内部氯离子分布。电场强度大的区域,氯离子迁出速率高,残余氯离子浓度小;电场强度小的区域,氯离子迁出速率低,氯离子存在堆积现象。后续研究中可利用电场分布特征评估混凝土内部残余氯离子的分布特征。

3)证实了氯离子的非均匀电迁现象,研究了混凝土内电场与氯离子分布特征以及电场分布对电化学除氯的影响,但如何解决氯离子非均匀电迁现象还有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] MEHTA P K, BURROWS R W. Building durable structures in the 21st century [J]. Concrete International, 2001, 23(3): 57-63.
- [2] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 2版. 北京: 科学出版社,2014.
- [3] JIN W L, ZHAO Y X. Durability of Concrete Structures [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [4] ZHANG F, PAN J, LIN C. Localized corrosion behaviour of reinforcement steel in simulated concrete pore solution [J]. Corrosion Science, 2009, 51(9): 2130-2138.
- [5] 毛江鸿,金伟良,李志远,等. 氯盐侵蚀钢筋混凝土桥梁耐久性提升及寿命预测[J]. 中国公路学报, 2016, 29(1): 61-66.
- [6] MAO J H, JIN W L, LI Z Y, et al. Durability improvement and service life prediction of reinforced concrete bridge under chloride attack [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(1): 61-66. (in Chinese)
- [7] 吉鸣,干岳良,丁朝梅,等. 高性能混凝土及防腐涂料在浙江某码头中的应用[J]. 土木建筑与环境工程,

- 2015, 37(Sup1): 23-27.
- JI M, GAN Y L, DING C M, et al. Application of high performance concrete and coating of protective paint on a port in Zhejiang province [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(Sup1): 23-27. (in Chinese)
- [6] WU Y, ZHAO Z. Chloride transference during electrochemical chloride extraction process [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(6): 1466-1470.
- [7] 海港工程钢筋混凝土结构电化学防腐技术规范: JTS 153-2-2012 [S]. 北京:人民交通出版社, 2012. Technical specification for corrosion protection of reinforced concrete structures in harbor engineering: JTS 153-2-2012 [S]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese)
- [8] FAJARDO G, ESCADEILLAS G, ARLIGUIE G. Electrochemical chloride extraction (ECE) from steel-reinforced concrete specimens contaminated by "artificial" sea-water [J]. Corrosion Science, 2006, 48: 110-125.
- [9] TOUMI A, FRANCOIS R, ALVARADO O. Experimental and numerical study of electrochemical chloride removal from brick and concrete specimens [J]. Cement & Concrete Research, 2007, 37(1): 54-62.
- [10] 祝频, 王新祥, 韦江雄, 等. 电化学除盐模型及离子迁移过程的数值分析[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(5): 41-47. ZHU P, WANG X X, WEI J X, et al. Model and numerical analysis of ions migration in concrete during the process of electrochemical chloride extraction [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(5): 41-47. (in Chinese)
- [11] 郑靛, 韦江雄, 余其俊, 等. 电化学除盐中混凝土内氯离子的迁移特征研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(2): 42-45. ZHENG L, WEI J X, YU Q J, et al. Research of the chloride ion migration in concrete during electrochemical chloride extraction [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(2): 42-45. (in Chinese)
- [12] MAO J H. Experimental research on the distribution of chloride ion migration in concrete cover during electrochemical chloride extraction treatment [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2016, 11(5): 4076-4083.
- [13] 郭育霞. 钢筋混凝土电化学除氯及除氯后性能研究 [D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2010. GUO Y X. Study on electrochemical chloride extraction and post performance of reinforced concrete [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] LI L Y, PAGE C L. Modelling of electrochemical chloride extraction from concrete: Influence of ionic activity coefficients [J]. Computational Materials Science, 1998, 9(3/4):303-308.
- [15] 张嘉新, 高小建, 朱卫中. 外电场作用下混凝土中离子的迁移与分布规律研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(8): 9-14. ZHANG J X, GAO X J, ZHU W Z. Study on migration and distribution of ions in concrete under external electric field [J]. China Concrete and Cement Products, 2012(8): 9-14. (in Chinese)
- [16] CAÑÓN A, GARCÉS P, CLIMENT M A, et al. Feasibility of electrochemical chloride extraction from structural reinforced concrete using a sprayed conductive graphite powder-cement paste as anode [J]. Corrosion Science, 2013, 77: 128.

(编辑 胡英奎)