

钢筋锈蚀氯离子临界浓度研究进展

蒋林华^{1,2}, 白舒雅¹, 徐金霞¹, 张 研¹, 储洪强¹

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098;

2. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 鉴于钢筋锈蚀氯离子临界浓度对钢筋混凝土结构的使用寿命有很大影响, 从钢筋锈蚀氯离子临界浓度的表达形式、测试方法、影响因素等方面对国内外氯离子临界浓度的研究进展进行综述, 给出了已有研究成果得到的氯离子临界浓度值和有关国家标准中限定的氯离子浓度, 提出氯离子临界浓度的影响机理、测试方法、影响因素的耦合作用、计算模型和提高方法等有待进一步研究的问题。

关键词: 混凝土; 钢筋锈蚀; 氯离子临界浓度; 综述

中图分类号: TU528.571

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2015)05-0077-06

Review on research of threshold chloride concentration of reinforcing steel corrosion in concrete//JIANG Linhua^{1,2}, BAI Shuya¹, XU Jinxia¹, ZHANG Yan¹, CHU Hongqiang¹ (1. *College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In consideration of the significant influence of the threshold chloride concentration of reinforcing steel corrosion on the service life of reinforced concrete structures, developments in research of threshold chloride concentration around the world are reviewed from the aspects of its expression, testing methods, and factors. Chloride threshold levels from previous research are presented, and the maximum allowable concentrations of chloride ions set as national standards in China are also provided. Some issues related to threshold chloride concentration are put forward for further research, including the influence mechanisms, testing methods, multi-factor coupling effect, and optimization of calculation models.

Key words: concrete; reinforcing steel corrosion; threshold chloride concentration; review

混凝土材料具有适应性强、成本低廉、坚固耐用等优点, 被广泛应用于水利、交通、建筑、国防、能源等工程中。混凝土的耐久性事关工程安全和社会经济发展, 越来越受到人们的重视^[1]。氯离子侵入是氯盐环境中工作的钢筋混凝土结构诱发钢筋锈蚀的主要原因。当混凝土中的氯离子超过一定浓度(氯离子临界浓度)时, 钢筋表面的钝化膜就会遭到破坏, 钢筋开始锈蚀。钢筋锈蚀氯离子临界浓度对钢筋混凝土结构的使用寿命有很大影响^[2]。

当前, 我国正在实施沿海开发、西部大开发等战略, 大型挡潮闸、跨海大桥、海港等各类工程正在加速建设, 对工程的耐久性和使用寿命提出了明确要求。这些工程多处在氯盐环境下工作, 开展钢筋锈蚀氯离子临界浓度研究对确保工程安全运行、准确预测和提高工程使用寿命具有十分重要的意义。笔

者从钢筋锈蚀氯离子临界浓度的表达形式、测试方法、影响因素等方面介绍氯离子临界浓度的研究进展, 并提出未来的研究建议。

1 氯离子临界浓度的表达形式

钢筋锈蚀氯离子临界浓度的表达形式主要有: 游离氯离子含量、总氯离子含量、 $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ 和 $[\text{Cl}^-]/[\text{H}^+]$ 。

1.1 游离氯离子含量

氯离子在混凝土内的存在形式主要有 2 种: 一种是在混凝土孔隙液中能自由移动的游离氯离子; 另一种是与水泥中的 C_3A 和水泥水化产物结合的结合氯离子。一般认为只有游离氯离子才会使钢筋表面的钝化膜遭到破坏, 导致钢筋锈蚀; 结合氯离子不能自由移动, 位置固定, 不会影响钢筋腐蚀进

程^[3]。因此,用游离氯离子含量表示临界氯离子浓度。由于混凝土中粘附在钢筋表面的水泥水化产物可以抵制和缓冲由腐蚀引起的 pH 值下降,从而起到保护钢筋免于腐蚀的作用。综合考虑氯离子的腐蚀诱导和胶凝材料的腐蚀保护 2 种作用,混凝土中钢筋锈蚀氯离子临界浓度表示为游离氯离子与胶凝材料的质量比值。

1.2 总氯离子含量

早期用游离氯离子含量表示氯离子临界浓度,但由于混凝土中游离氯离子含量难以准确测定,而且研究表明结合氯离子也有可能参与到钢筋的腐蚀过程,因此世界各国颁布的标准都用总氯离子与胶凝材料的质量比来表示混凝土中钢筋锈蚀氯离子临界浓度^[3-4]。用总氯离子与胶凝材料的质量比表示的氯离子临界浓度,综合考虑了混凝土的阻锈特性受胶凝材料含量的影响和结合氯离子的侵蚀性,更准确显示了混凝土中钢筋的腐蚀风险^[4]。

1.3 [Cl⁻]/[OH⁻]

较高的碱度可以抑制钢筋锈蚀的发展,[Cl⁻]/[OH⁻]这一表达形式考虑了氢氧根离子对钢筋的钝化保护作用。氯离子临界浓度随着溶液 pH 值的增加而递增,不是一个固定值,而是一个变化范围,溶液的[Cl⁻]/[OH⁻]对氯离子临界浓度有着很大的影响。这个表达形式被广泛使用,但主要用于碱性混凝土模拟孔溶液中氯离子临界浓度的表达^[3]。与游离氯离子含量表示的氯离子临界浓度相似,[Cl⁻]/[OH⁻]也没有考虑被结合氯离子的腐蚀风险。这一表达形式还忽略了水泥水化产物对钢筋的保护作用,而且实际应用困难。

1.4 [Cl⁻]/[H⁺]

[Cl⁻]/[H⁺]是近年来通过研究提出的氯离子临界浓度新的表达形式,用酸溶的氯离子含量和酸中和容量来表达混凝土的侵蚀和阻锈特性^[5-6]。河海大学的研究结果表明,被结合氯离子也会参与混凝土中钢筋的腐蚀过程,[Cl⁻]/[H⁺]表示的氯离子临界浓度离散性小,是一种较好的氯离子临界浓度表达形式^[2]。这种氯离子临界浓度表达形式的可靠性尚需进一步论证。

2 氯离子临界浓度的测试方法

氯离子临界浓度是对应于钢筋表面钝化膜遭到破坏(钢筋开始锈蚀)时的氯离子浓度。因此,氯离子临界浓度测试方法的关键是准确判定混凝土中钢筋的活性腐蚀临界点,即钢筋的脱钝。钢筋脱钝难以用肉眼判别,常用电化学方法进行测定。氯离子临界浓度的测试方法主要有:半电池电位法、宏电池

法、线性极化法、电化学阻抗谱法等。

2.1 半电池电位法

半电池电位法(half-cell potential, HCP)是钢筋腐蚀状态测试中应用最早、最广泛的方法,具有简单、经济、操作方便等特点,通过测定钢筋表面的微阳极和微阴极的混合电位来判别钢筋的腐蚀状态。Hussain 等^[7]于 1996 年以饱和甘汞电极为参比电极,以-270mV vs. SCE 的钢筋电位值作为钢筋活性腐蚀的判据,由持续监测的浸泡在 5% 氯化钠溶液中的不同 C₃A 含量水泥砂浆中钢筋的半电池电位值确定临界氯离子浓度。Oh 等^[8]认为钢筋的半电池电位值-300mV vs. CSE 是钢筋活性腐蚀发生的临界点,由相对胶凝材料质量比为 0 ~ 2% 之间的 8 个掺氯化钠混凝土中钢筋的半电池电位和实际腐蚀面积测得。Moon 等^[9-10]用半电池电位法诊断了水下抗分散混凝土中钢筋活性腐蚀的临界点。Khatrri 等^[11]以半电池电位法为基准确定了混凝土中钢筋发生活性腐蚀所对应的临界极化电阻值。

用半电池电位法判定钢筋活性腐蚀发生的起始点存有较大的风险,应综合考察环境因素。

2.2 宏电池法

钢筋混凝土结构中的钢筋/混凝土界面存在非均匀性,在氯盐环境下,通常会形成分离的阳极和阴极,产生所谓的宏电池腐蚀。宏电池法(macro-cell, MC)由宏电流来判断和评价钢筋的腐蚀风险,可通过活化的阳极和钝化的阴极直接测定。Ryou 等^[12]以钛网为阴极,由持续监测浸泡在 4mol/L 氯化钠溶液中的混凝土中钢筋腐蚀的宏电流,确定钢筋锈蚀的氯离子临界浓度。David 等^[13]用该方法测定了热浸镀锌钢筋的临界腐蚀点。Hartt 等^[14]以宏电池电流结合半电池电位值判别腐蚀临界点,确定氯离子临界浓度。

用宏电流法判别钢筋活性腐蚀的起始点不宜用某一个具体的宏电流值,也不宜用宏电流的测试值直接评价混凝土中钢筋的腐蚀程度。

2.3 线性极化法

线性极化法(linear polarization, LP)是使用最为广泛的混凝土中钢筋活性腐蚀起始点的判别方法,可定量反映混凝土中钢筋的腐蚀速度和腐蚀程度,具有操作方便快捷、测试精度高等优点,由测得的腐蚀电流密度诊断钢筋腐蚀发生的临界点,由极化电阻评价钢筋的腐蚀速度,极化电阻由钢筋通微电流时自然电位附近产生的电位变化量测得。如 Hope 等^[15]对不同掺量氯化钙的混凝土中钢筋的腐蚀电流密度用线性极化法进行了测试,发现内掺 0.2% ~ 0.4% 氯化钙(相对水泥质量)时,钢筋的腐

蚀电流密度迅速增长,由此判定钢筋活性腐蚀发生。Andrade 等^[16]提出将腐蚀电流密度值与钢筋的腐蚀状态直接对应起来,如以腐蚀电流密度 0.1 ~ 0.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 对应的氯离子浓度值作为氯离子临界浓度范围。

线性极化法测试过程中需要进行 IR 降(电流和电阻所引起的偏差)的补偿,存在测试结果易受扫描速度、浸泡时间和钢筋暴露面积等因素的影响等问题。

2.4 电化学阻抗谱法

电化学阻抗谱法(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)能够获得较多动力学信息及电极界面结构信息,是一种以小振幅的交流信号为扰动信号的电化学测量方法。首次将电化学阻抗谱引入混凝土中研究钢筋腐蚀行为的是 Dawson 课题组^[17]。Poupard 等^[18]以极化电阻出现显著下降判别钢筋腐蚀起始临界点,通过持续监测外部氯离子渗透条件下钢筋混凝土结构的电化学阻抗谱,并对阻抗谱低频处用等效电路模拟获得不同渗透时期的极化电阻。对混凝土阻抗谱的解释,史美伦等^[19]认为应在整个频率范围内分析阻抗谱的拓扑特性,即图形的形状和曲线的走向,不应拘泥于某一个特定的测量值和模拟值。李岩等^[20]通过阻抗谱拓扑结构变化以及其他的电化学判别手段测定了粉煤灰、矿渣混凝土中钢筋腐蚀的起始临界点。

电化学阻抗谱法所需测试仪器较为复杂,测试时间较长,由于图谱复杂,一些结果与模拟所采用的模型密切相关。

2.5 其他方法

除了上述介绍的 4 种测试方法外,还有其他的电化学方法,如自腐蚀电位和恒电流极化法^[21-22]、恒电位极化法^[23-24]、循环极化法^[25]等。此外,Moreno 等^[26]采用动电位极化曲线,确定孔蚀电位,并以孔蚀电位相对于氧气的析出电位显著变化作为钢筋活性腐蚀临界点。混凝土的电阻率可用于判别钢筋腐蚀的临界点^[27]。失重法(mass loss, MS)也常被用于评价混凝土中钢筋的腐蚀状态,并确定临界氯离子浓度。

3 氯离子临界浓度的影响因素

混凝土中钢筋锈蚀氯离子临界浓度的影响因素众多,疲劳作用、孔溶液组成、氯离子结合能力、矿物掺和料、阻锈剂、钢筋/混凝土表界面条件等均会影响钢筋锈蚀氯离子临界浓度。

3.1 疲劳作用

疲劳作用是钢筋混凝土结构服役过程中遇到的

常见荷载形式。挡潮闸、码头、跨海大桥、撤除冰盐的路桥等建筑物,既受到氯离子的侵入作用,又受到车辆、波浪等疲劳荷载作用。河海大学在国家自然科学基金资助下,开展了拉伸、压缩和弯曲疲劳作用对钢筋锈蚀氯离子临界浓度的影响研究,得到了疲劳作用对钢筋锈蚀氯离子临界浓度的影响规律,分析了疲劳作用影响钢筋锈蚀氯离子临界浓度的机理^[28-30]。在拉伸和弯曲疲劳作用下,钢筋锈蚀氯离子临界浓度随着疲劳应力水平的提高和疲劳次数的增加而逐渐减小;在压缩疲劳作用下,钢筋锈蚀氯离子临界浓度随着疲劳次数的增加呈现先增大后减小的趋势。

3.2 混凝土孔溶液组成

氯盐环境中的侵蚀离子种类和浓度范围变化较大,有 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 等离子。混凝土孔溶液中主要有 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 OH^- 和 Cl^- 等离子。河海大学在国家自然科学基金资助下,开展了阳离子、阴离子种类对钢筋锈蚀氯离子临界浓度的影响研究,得到了阳离子、阴离子种类对钢筋锈蚀氯离子临界浓度的影响规律,分析了阳离子、阴离子种类影响钢筋锈蚀氯离子临界浓度的机理^[31-32]。研究的阳离子种类主要有 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 。在饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中,与 NaCl 和 KCl 对应的氯离子临界浓度相比, MgCl_2 和 CaCl_2 降低钢筋腐蚀的氯离子临界浓度;水泥提取液中,与 NaCl 和 KCl 对应的氯离子临界浓度相比, MgCl_2 和 CaCl_2 提高钢筋腐蚀的氯离子临界浓度;在混凝土中, $C_{\text{free}}(\text{MgCl}_2) < C_{\text{free}}(\text{CaCl}_2) < C_{\text{free}}(\text{NaCl}) < C_{\text{free}}(\text{KCl})$ (氯离子临界浓度用游离氯离子含量 C_{free} 表达)。模拟液和混凝土介质中结果不同的原因是阳离子类型影响氯离子结合能力。研究的阴离子种类主要有 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 。 HCO_3^- 会降低溶液的 pH 值,降低氯离子临界浓度,增加钢筋的腐蚀风险; SO_4^{2-} 会降低氯离子临界浓度,提高钢筋的腐蚀速率。

孔溶液的 pH 值也会影响氯离子临界浓度。较早将钢筋锈蚀氯离子临界浓度与孔溶液中的 pH 值联系起来的是 Hausmann^[33] 和 Gouda 等^[34]。一般认为,孔溶液 pH 值升高,钢筋锈蚀氯离子临界浓度增加。

3.3 氯离子结合能力

水泥中的 C_3A 和 C_4AF 含量对于氯离子结合能力有着重要的影响, C_3A 和 C_4AF 含量越高,化学结合氯离子形成 Friedel 盐(弗里德尔盐)也就会越多。Hussain 等^[35]以 $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-] = 0.3$ 为临界值,选用 C_3A 含量为 2.43%、7.59% 和 14% 的 3 种水泥,得到 3 种水泥净浆中的钢筋锈蚀氯离子临界浓度(用

游离氯离子含量表达) 分别为 0.134%、0.165% 和 0.215% (相对于水泥质量), 用总氯离子含量表示分别为 0.35%、0.62% 和 1.0% (相对于水泥质量)。即随着水泥中 C_3A 含量增加, 氯离子临界浓度显著增加。Suryavanshi 等^[36] 和 Oh 等^[8] 得到了类似结论。但 Hussain 等^[7] 和 Hansson 等^[37] 得到了不同的研究结果, 氯离子临界浓度与氯离子结合能力并没有联系。

3.4 矿物掺和料

矿物掺和料会降低混凝土的 pH 值, 影响混凝土的结合氯离子数量, 进而影响氯离子临界浓度。Thomas^[38] 研究显示随着粉煤灰掺量的增加, 钢筋腐蚀氯离子临界浓度逐渐减小。Oh 等^[8] 研究得到同样结论。但 Breit 等^[39] 以内掺方式引入氯离子, 并用宏电池法研究表明随粉煤灰掺量的增加, 钢筋锈蚀氯离子临界浓度反而升高。Alonso 等^[40] 则发现掺加粉煤灰对氯离子临界浓度没有明显影响。Oh 等^[8] 研究发现磨细高炉矿渣对于氯离子临界浓度没有明显影响。但 Gouda 等^[41] 研究认为随矿渣掺量的增加, 钢筋腐蚀氯离子临界浓度下降, 而 Breit 等^[39] 研究却显示一个相反趋势。Manera 等^[42] 研究得到掺 10% 硅粉降低了钢筋锈蚀氯离子临界浓度。Tang 等^[43] 通过研究暴露于海工环境下 13 年的钢筋混凝土板表明, 硅粉和粉煤灰掺和料对氯离子临界浓度没有明显的影响。河海大学的研究结果表明, 矿物掺和料对氯离子临界浓度影响规律依赖于氯离子临界浓度的表达形式, 用 $[Cl^-]/[H^+]$ 表示的氯离子临界浓度不随掺和料类型和掺量变化而变化; 用总氯离子和游离氯离子表达的氯离子临界浓度随粉煤灰掺量的增加而下降^[44]。

3.5 阻锈剂

阻锈剂具有廉价、使用方便和适用面广等优点, 是提高氯盐环境下钢筋混凝土结构耐久性的一项重要措施。最早用于混凝土中钢筋腐蚀防护的阻锈剂是亚硝酸盐。有关亚硝酸盐的阻锈机理和阻锈效果有较多研究报道, 但亚硝酸盐对氯离子临界浓度的影响研究相对较少。Ann 等^[45] 和 Reou 等^[46] 研究表明, 混凝土中添加 $Ca(NO_2)_2$ 能提高氯离子临界浓度; Ormellese 等^[47] 通过分析 10 年试验结果, 认为亚硝酸盐稍提高了氯离子临界浓度范围。但 Mammoliti 等^[48] 的研究却显示亚硝酸盐阻锈剂虽然在砂浆中能够有效延缓钢筋腐蚀的发生, 但在碱性混凝土模拟孔溶液中对氯离子临界浓度并没有影响。除亚硝酸盐外, 其他类型阻锈剂对氯离子临界浓度的影响鲜见研究报道。河海大学选用阳极型、阴极型和混合型阻锈剂, 在饱和氢氧化钙混凝土模

拟液和混凝土介质中进行氯离子临界浓度研究, 得到: 在混凝土模拟液中, 阻锈剂能显著降低腐蚀电流密度, 复掺阻锈剂和掺和料能有效降低钢筋腐蚀速率, 提高氯离子临界浓度; 在混凝土介质中, 阳极型、混合型阻锈剂能提高氯离子临界浓度, 阴极型阻锈剂对氯离子临界浓度基本没有影响, 但能降低钢筋的腐蚀速度^[49-52]。

3.6 钢筋/混凝土表面条件

钢筋的表面与钢筋/混凝土界面是钢筋腐蚀实际发生的位置, 对氯离子临界浓度有重要的影响。Mammoliti 等^[53] 在碱性混凝土模拟孔溶液研究中研究得到钢筋表面预抛光及提高表面抛光的质量都会提高氯离子临界浓度的结论。Mohammed 等^[54] 在混凝土介质中, 比较研究了未经任何表面处理的钢筋 (M)、预抛光钢筋 (P)、预腐蚀的红锈钢筋 (BR)、预腐蚀的黑锈钢筋 (BL) 和预钝化钢筋 (PP), 结果显示各种表面钢筋的氯离子临界浓度顺序关系为: $PP > BL > P > BR > M$ 。此外, Mohammed 等^[55] 的研究还显示在钢筋混凝土结构成型时, 使用水泥浆涂覆钢筋将显著提高氯离子临界浓度。而 Manera 等^[56] 的试验却显示带肋钢筋和光圆钢筋的氯离子临界浓度没有明显的差别, 钢筋表面预抛光对氯离子临界浓度虽有影响, 但影响较小。

3.7 其他因素

Poupard 等^[18] 和 Hansson 等^[37] 研究表明, 水灰比增加会使氯离子临界浓度下降。温度、湿度也会影响氯离子临界浓度, Hussain 等^[35] 试验发现环境温度从 20℃ 升高到 70℃, 氯离子临界浓度降低至原来的 1/5; 李岩等^[20] 通过对比研究显示干湿循环比全浸泡的钢筋混凝土试件的氯离子临界浓度要低。混凝土电阻率也会影响氯离子临界浓度, Morris 等^[27] 通过试验发现混凝土的电阻率增加, 氯离子临界浓度相应提高。此外, 测试方法对氯离子临界浓度的测试结果有很大影响。

4 氯离子临界浓度的研究成果

已有研究报道的氯离子临界浓度结果并不一致, 且离散性很大。用总氯离子含量表示的氯离子临界浓度范围在 0.079% ~ 2.9% (相对于水泥质量) 之间, 用游离氯离子含量表示的氯离子临界浓度在 0.03% ~ 0.364% (相对于水泥质量) 之间, 而用 $[Cl^-]/[OH^-]$ 表示的氯离子临界浓度在 0.16 ~ 63 范围内, 如此宽分布范围的氯离子临界浓度报道结果使人们在实际应用时很难对氯离子临界浓度值进行取舍^[3]。为确保工程安全和有足够的耐久寿命, 各国标准对混凝土中最大氯离子含量进行规定,

表 1 是英美国家相应规范限定的最大氯离子含量 (相对于水泥质量)^[3]。此外,日本在规范中也规定,对于耐久性要求较高的钢筋混凝土,Cl⁻ 总量不超过 0.3 kg/m³,而对一般钢筋混凝土,Cl⁻ 总量不超过 0.6 kg/m³^[56]。GB50010—2010《混凝土结构设计规范》规定预应力构件混凝土中最大氯离子含量为 0.05% (相对于胶凝材料总量),环境等级一~三类的结构混凝土中最大氯离子含量在 0.1%~0.3% (相对于胶凝材料总量),一类环境中,设计使用年限为 100 年的结构混凝土中最大氯离子含量为 0.05% (相对于胶凝材料总量)^[57]。这些规范限定的最大氯离子含量只是粗略区分了暴露条件,对于其他可能影响氯离子临界浓度的因素并未作辨别,所限定的最大氯离子含量较为保守。

表 1 英美国家相应标准中限定的氯离子含量

类 型	暴露条件	最大氯离子含量/%			
		BS8110	ACI201	ACI357	ACI222
预应力混凝土		0.10		0.06	0.08
普通钢筋混凝土	氯盐环境	0.20	0.10	0.10	0.20
	干燥环境	0.40			
其他钢筋混凝土			0.15		

5 有待进一步研究的问题

国内外学者对钢筋锈蚀氯离子临界浓度的表达形式、测试方法、影响因素等进行了大量研究。但由于测试方法不同,影响因素众多且各因素之间存在复杂耦合效应,使得氯离子临界浓度的研究变得尤为复杂。此外,迄今为止还没有准确的数学模型能够预测主要影响因素对氯离子临界浓度的影响。因此,笔者认为以下几个方面需要深入研究:

- a. 氯离子临界浓度的影响机理研究。已有研究报道的氯离子临界浓度值过于离散,一些因素影响氯离子临界浓度的规律性还存有争议,研究氯离子临界浓度的影响机理,可为后续研究提供可靠依据。
- b. 氯离子临界浓度的测试方法研究。现有电化学阻抗谱、动电位极化、半电池电位、线性极化、阶跃等方法,通过比较试验研究等手段,提出可靠的检测和判定方法对准确测定氯离子临界浓度至关重要。
- c. 影响因素的耦合作用研究。现有研究大多集中在单因素作用,多因素耦合作用更符合工程的真实环境。
- d. 计算模型研究。根据多因素耦合作用条件下的试验结果和影响机理研究,建立氯离子临界浓度的计算模型,指导工程建设和管理养护。

e. 氯离子临界浓度提升方法研究。研究掺和料、阻锈剂、新型涂层等提升氯离子临界浓度的方法和措施,提高氯盐环境下钢筋混凝土结构的使用寿命。

参考文献:

[1] 蒋林华. 混凝土材料学[M]. 南京:河海大学出版社, 2006.

[2] ANGST U, ELSENER B, LARSEN C K, et al. Critical chloride content in reinforced concrete: a review [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39 (12): 1122-1138.

[3] ANN K Y, SONG H. Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete[J]. Corrosion Science, 2007, 49 (11): 4113-4133.

[4] GLASS G K, BUENFELD N R. The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete[J]. Corrosion Science, 2000, 42 (2): 329-344.

[5] SERGI G, GLASS G K. A method of ranking the aggressive nature of chloride contaminated concrete [J]. Corrosion Science, 2000, 42 (12): 2043-2049.

[6] THOMAS M. Chloride thresholds in marine concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26 (4): 513-519.

[7] HUSSAIN S E, AAMAD S A G, RASHEEDUZZAFAR S. Chloride threshold for corrosion of reinforcement in concrete[J]. ACI Materials Journal, 1996, 93 (6): 534-538.

[8] OH B H, JANG S Y, SHIN Y S. Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures[J]. Magazine of Concrete Research, 2003, 55 (2): 117-124.

[9] MOON H Y, SHIN K J. Evaluation on steel bar corrosion embedded in antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36 (3): 521-529.

[10] MOON H Y, SHIN K J. Frost attack resistance and steel bar corrosion of antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21 (1): 98-108.

[11] KHATRI R P, SIRVIVATNANON V, HEELEY P. Critical polarization resistance in service life determination[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34 (5): 829-837.

[12] RYOU J S, ANN K Y. Variation in the chloride threshold level for steel corrosion in concrete arising from different chloride sources [J]. Magazine of Concrete Research, 2008, 60 (3): 177-187.

[13] DAVID D, JOANN B, MATTHEW O R, et al. Critical chloride corrosion threshold of galvanized reinforcing bars [J]. ACI Materials Journal, 2009, 106 (2): 176-183.

- [14] HARTT W H, NAM J. Effect of cement alkalinity on chloride threshold and time-to-corrosion of reinforcing steel in concrete[J]. Corrosion, 2008, 64 (8): 671-680.
- [15] HOPE B B, IP A K C. Chloride corrosion threshold in concrete[J]. ACI Materials Journal, 1987, 84 (4): 306-314.
- [16] ANDRADE C, ALONSO C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method [J]. Materials and Structures, 2004, 37 (9): 623-643.
- [17] JOHN DG, SEARSON P C, DAWSON J L. Use of AC impedance technique in studies on steel in concrete in immersed conditions[J]. British Corrosion Journal, 1981, 16 (2): 102-106.
- [18] POUPARD O, MOKHTAR A A, DUMARGUE P. Corrosion by chlorides in reinforced concrete: determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34 (6): 991-1000.
- [19] 史美伦, 杨正宏. 混凝土阻抗谱的拓扑结构[J]. 建筑材料学报, 2002, 5 (2): 132-136. (SHI Meilun, YANG Zhenghong. Topological structure of the spectroscopy of AC impedance for concrete[J]. Journal of Building Materials, 2002, 5(2): 132-136. (in Chinese))
- [20] 李岩, 朱雅仙, 方景. 混凝土中钢筋腐蚀的氯离子临界浓度试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2004 (1): 24-28. (LI Yan, ZHU Yaxian, FANG Jing. Experimental study of chloride ion's critical content causing reinforcement corrosion in concrete[J]. Hydro-Science and Engineering, 2004 (1): 24-28. (in Chinese))
- [21] LI L, SAGUES A A. Chloride corrosion threshold of reinforcing steel in alkaline solutions-open-circuit immersion tests[J]. Corrosion, 2001, 57 (1): 19-28.
- [22] ALONSO C, CASTELLOTE M, ANDRADE C. Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements [J]. Electrochimica Acta, 2002, 47 (21): 3469-3481.
- [23] IZQUIERDO D, ALONSO C, ANDRADE C, et al. Potentiostatic determination of chloride threshold values for rebar depassivation: experimental and statistical study [J]. Electrochimica Acta, 2004, 49 (17-18): 2731-2739.
- [24] 宋晓冰, 孔启明, 刘西拉. 普通硅酸盐混凝土中临界氯离子浓度的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40 (11): 59-63. (SONG Xiaobing, KONG Qiming, LIU Xila. Experimental study on chloride threshold levels in OPC [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(11): 59-63. (in Chinese))
- [25] LI L, SAGUES A A. Chloride corrosion threshold of reinforcing steel in alkaline solutions-effect of specimen size[J]. Corrosion, 2004, 60 (2): 195-202.
- [26] MORENO M, MORRIS W, ALVAREZ M G, et al. Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions; effect of carbonation and chloride content[J]. Corrosion Science, 2004, 46 (11): 2681-2699.
- [27] MORRIS W, VICO A, VAZQUEZ M. Chloride induced corrosion of reinforcing steel evaluated by concrete resistivity measurements [J]. Electrochimica Acta, 2004, 49 (25): 4447-4453.
- [28] 朱承龙. 拉伸疲劳作用对混凝土氯离子扩散及临界氯离子浓度影响的研究[D]. 南京: 河海大学, 2015.
- [29] JIANG Linhua, LIU Hao, CHU Hongqiang, et al. Influence of compression fatigue on chloride threshold value for the corrosion of steels in simulated concrete pore solutions [J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 699-704.
- [30] 王永亮. 弯曲疲劳对混凝土中钢筋锈蚀氯离子临界浓度的影响[D]. 南京: 河海大学, 2014.
- [31] JIANG Linhua, LIU Rong, MO Lili, et al. Influence of chloride salt type on critical chloride content of reinforcement corrosion in concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2013, 65 (5): 319-331.
- [32] 刘蓉. 共存阴离子对钢筋腐蚀临界氯离子浓度的影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2014.
- [33] HAUSMANN D A. Steel corrosion in concrete; how does it occur[J]. Materials Protection, 1967, 6 (11): 19-23.
- [34] GOUDA V K, HALAKA W Y. Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel; immersion in alkaline solution[J]. British Corrosion Journal, 1970, 5 (5): 198-203.
- [35] HUSSAIN S E, RASHEEDUZZAFAR S, AL-MUSALLAM A. Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25 (7): 1543-1555.
- [36] SURYAVANSHI A K, SCANTLEBURY J D, LYON S B. Corrosion of reinforcement steel embedded in high water-cement ratio concrete contaminated with chloride [J]. Cement and Concrete Composites, 1998, 20 (4): 263-281.
- [37] HANSSON C M, SORENSEN B. The threshold concentration of chloride in concrete for the initiation of reinforcement corrosion[C]//BERKE N S, CHAKER V, WHITING D. Corrosion rates of steel in concrete. Philadelphia: ASTM, 1990.
- [38] THOMAS M. Chloride thresholds in marine concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26 (4): 513-519.
- [39] BREIT W, SCHIESSL P. Investigation on the threshold value of the critical chloride content[C]//MALHOTRA V M. Proceedings of the Fourth CANMET/ACI Conference on Durability of Concrete. Detroit: American Concrete Institute, 1997.
- [40] ALONSO C, CASTELLOTE M, ANDRADE C. Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements [J]. Electrochimica Acta, 2002, 47 (21): 3469-3481.

(下转第 94 页)

- [11] HUANG D Z, CHEN L Z. Studies on parallel seismic testing for integrity of cemented soil columns[J]. Journal of Zhejiang University Science; Ser A, 2007, 8(11): 1746-1753.
- [12] 黄大治, 陈龙珠. 旁孔透射波法检测既有建筑物桩基的三维有限元分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1569-1574. (HUANG Dazhi, CHEN Longzhu. 3D finite element analysis of parallel seismic tests for integrity of piles of existing structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1569-1574. (in Chinese))
- [13] HUANG Y H, NI S H. Experimental study for the evaluation of stress wave approaches on a group pile foundation[J]. NDT&E International, 2012, 47: 134-143.
- [14] NI S H, HUANG Y H, ZHOU X M, et al. Inclination correction of the parallel seismic test for pile length detection[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(2): 127-132.
- [15] ZHANG J Y, CHEN L Z. Discussion of a study on the application of the parallel seismic method in pile testing [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2014, 67: 370-371.
- [16] YU X, FANG J, LIN G. Seismic CPTU to assist the design on existing foundations [J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 2010, 201: 169-177.
- [17] NIEDERLEITHINGER E. Improvement and extension of the parallel seismic method for foundation depth measurement[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(6): 1093-1101.
- [18] ZHANG J Y, CHEN L Z. Selection of pile testing signals for parallel seismic test [J]. Advanced Materials Research, 2012, 368-373: 2045-2049.
- [19] 张敬一. 既有工程桩动测技术及分析方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [20] 陈龙珠, 吴世明. 勘测完全饱和土层初见深度的弹性波速法[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(1): 82-88. (CHEN Longzhu, WU Shiming. Determination of full saturation depth of strata with elastic wave velocities [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(1): 82-88. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-06-09 编辑: 郑孝宇)

(上接第 82 页)

- [41] GOUDA V K, HALAKA W Y. Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel: embedded in concrete[J]. British Corrosion Journal, 1970, 5(5): 204-208.
- [42] MANERA M, VENNESLAND O, BERTOLINI L. Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume[J]. Corrosion Science, 2008, 50(2): 554-560.
- [43] TANG L, UTGENANT P. A field study of critical chloride content in reinforced concrete with blended binder[J]. Materials and Corrosion, 2009, 60(8): 617-622.
- [44] XU Jinxia, JIANG Linhua, WANG Weilun, et al. Chloride threshold value for reinforcement corrosion in concrete with additions of silica fume or fly ash[J]. Magazine of Concrete Research, 2011, 63(12): 905-913.
- [45] ANN K Y, JUNG H S, KIM H S, et al. Effect of calcium nitrite-based corrosion inhibitor in preventing corrosion of embedded steel in concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(3): 530-535.
- [46] REOU J S, ANN K Y. Electrochemical assessment on the corrosion risk of steel embedment in OPC concrete depending on the corrosion detection techniques [J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 113(1): 78-84.
- [47] ORMELLESE M, BOLZONI F, LAZZARI L, et al. Effect of corrosion inhibitors on the initiation of chloride-induced corrosion on reinforced concrete structures[J]. Materials and Corrosion, 2008, 59(2): 98-106.
- [48] MAMMOLITI L, HANSSON C M, HOPE B B. Corrosion inhibitors in concrete: part II effect on chloride threshold values for corrosion of steel in synthetic pore solutions [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(10): 1583-1589.
- [49] 徐金霞. 混凝土中钢筋腐蚀的临界氯离子浓度研究 [D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [50] 王麒. 钢筋腐蚀的临界氯离子浓度及提升措施研究 [D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [51] 吴珊珊. 阻锈剂和矿物掺合料对钢筋氯盐腐蚀的影响研究 [D]. 南京: 河海大学, 2012.
- [52] XU Jinxia, JIANG Linhua, WANG Weilun, et al. Effectiveness of inhibitors in upgrading chloride threshold value for steel corrosion [J]. Water Science and Engineering, 2013, 6(3): 354-363.
- [53] MAMMOLITI L T, BROWN L C, HANSSON C M, et al. The influence of surface finish of reinforcing steel and pH of the test solution on the chloride threshold concentration for corrosion initiation in synthetic pore solutions [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(4): 545-550.
- [54] MOHAMMED T U, HAMADA H. Corrosion of steel bars in concrete with various steel surface conditions [J]. ACI Materials Journal, 2006, 103(4): 233-242.
- [55] MANERA M, VENNELAND O, BERTOLINI L. Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume[J]. Corrosion Science, 2008, 50(2): 554-560.
- [56] 洪乃丰. 混凝土中钢筋腐蚀与结构物的耐久性[J]. 公路, 2001(2): 66-69. (HONG Naifeng. Corrosion of steel in concrete and structure durability [J]. Highway, 2001, (2): 66-69. (in Chinese))
- [57] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].

(收稿日期: 2014-06-09 编辑: 方宇彤)