

公路桥梁氯离子含量检测与钢筋锈蚀评价研究

胡志成

新疆北新科技创新咨询有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]氯离子腐蚀是造成公路桥梁混凝土结构耐久性下降的主要原因。文章以公路桥梁氯离子含量检测以及钢筋锈蚀评价为中心, 对氯盐腐蚀环境类别及钢筋去钝生锈机理进行了整理, 论述了现场取样布置要点以及实验室测试手段的应用范围, 介绍了半电池电位法、线性极化法等非破坏性检测技术及判断依据, 说明了破损检测和锈蚀体积实际测量方案, 总结了不同级别锈蚀程度以及评定标准。基于氯离子临界饱和度及锈蚀起始准则、氯离子分布与钢筋腐蚀时间空间关系这两个方面, 形成了氯离子锈蚀关系模型, 并给出了桥梁构件耐久性复合评价模型及应用于维修决策的方法。形成“现场取样-室内试验-无损检测-破坏性检验-相关判定”的完整的检测评价方法是开展公路桥梁氯盐侵蚀环境条件下耐久性定量分析以及有效维修保养的技术前提。

[关键词]公路桥梁; 氯离子含量; 钢筋锈蚀; 无损检测; 耐久性评价

DOI: 10.33142/ec.v9i6.19833

中图分类号: U448.7

文献标识码: A

Research on Detection of Chloride Ion Content and Evaluation of Reinforcement Corrosion in Highway Bridges

HU Zhicheng

Xinjiang Beixin Science and Technology Innovation Consulting Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: Chloride ion corrosion is the main reason for the decrease in durability of concrete structures in highway bridges. The article focuses on the detection of chloride ion content in highway bridges and the evaluation of steel corrosion. It summarizes the types of chloride salt corrosion environments and the mechanism of steel corrosion removal. It discusses the key points of on-site sampling layout and the application scope of laboratory testing methods. Non destructive testing techniques and judgment criteria such as half cell potential method and linear polarization method are introduced. The actual measurement schemes for damage detection and corrosion volume are explained, and the degree of corrosion at different levels and evaluation standards are summarized. Based on the critical saturation of chloride ions and the criteria for corrosion initiation, a chloride ion corrosion relationship model was formed in terms of the temporal and spatial relationship between chloride ion distribution and steel corrosion. A composite evaluation model for the durability of bridge components and its application in maintenance decision-making were also proposed. The formation of a complete testing and evaluation method of "on-site sampling - indoor testing - non-destructive testing - destructive testing - relevant judgment" is the technical prerequisite for conducting quantitative analysis of durability and effective maintenance of highway bridges under chloride erosion environmental conditions.

Keywords: highway bridges; chloride ion content; corrosion of steel bars; non destructive testing; durability evaluation

伴随着我国公路交通运输设施迅猛发展, 众多服役中的桥梁都已经进入了使用性能降低阶段, 结构耐久性问题日益严重, 而桥梁中氯化物的侵蚀则是造成钢筋锈蚀而引起结构损坏的主要原因。我国制定了一系列技术规范如《公路桥梁承载能力检测评定规程》, 对耐久性的检测评定作出标准化要求, 但是如何确定合理的检测位置, 采取合适的方法进行检测以及对锈蚀程度做出判断并且建立

起氯离子含量和锈蚀程度之间的定量关系, 仍然是需要进一步探讨的问题。

1 公路桥梁氯盐侵蚀环境与钢筋锈蚀机理

公路桥梁所在的氯盐侵蚀环境可以有很多种形式。第一种是海洋环境, 浪溅区、潮差区供给氯离子最充分、侵蚀作用最强; 第二种是冰雪融化环境: 冬天气温下降后桥面上撒布的融雪剂随融水渗入到板面及梁体两端造成氯

离子堆积；第三种是盐渍土和盐湖环境：桥梁底部及下构长期浸泡在高浓度的毛细吸湿氯盐溶液中。

氯离子腐蚀实际上是电化学反应。在 pH 约为 12.5~13.5 这一较高碱度水平的混凝土孔隙溶液中，钢筋表面会生成一层紧密的钝化层，在热力学上十分稳定。一旦有少量的氯离子穿透该钝化层进入钢筋表面，当氯离子含量增加到超过 0.2%，钢筋就会出现明显的锈蚀现象^[1]。氯离子对钝化层破坏主要有以下几个方面：局部酸化腐蚀引起可溶性氯化物使钝化层部分溶解、去极化腐蚀使阳极区铁溶解、导电增加使孔隙溶液中的离子更容易通过从而降低腐蚀电池欧姆电阻。经典 Tuutti 混凝土破坏模型认为钢筋的腐蚀分为两个阶段：第一阶段是腐蚀初始阶段即腐蚀诱导阶段，第二阶段则是腐蚀加速阶段即腐蚀发展阶段。在钢筋混凝土中，钢筋表面的钝化膜被破坏而开始发生腐蚀反应是在钢筋周围出现一定量的氯离子，在混凝土内部钢筋周围氯离子浓度到达钢筋脱钝的临界点之后就会产生腐蚀反应，在钢筋混凝土的腐蚀发展期表现为钢筋截面不断减少以及锈胀力引起保护层的开裂脱落，最后钢筋失去承载能力，氯盐侵蚀往往伴随着荷载裂缝或碳化等因素一起出现，使得钢筋加快腐蚀过程，大大提高了耐久性的检验难度。

2 混凝土中氯离子含量检测技术

2.1 现场取样布点原则与方法

现场取样的合理性直接影响到检测结果的工程应用价值。氯离子含量检测应该依据被检测结构所处的环境状况以及自身质量情况选择测点，测点应当有代表性可反映各种工作环境状态的不同以及各种混凝土质量水平，并参考钢筋锈蚀电位测试结果进行选取。此原则是以环境影响因素差别及锈蚀警报为主要指标^[2]。具体应设置在桥面板下部受冰融盐侵蚀区、墩身浪溅区、潮差区、梁缝伸缩变形区附近的漏水区域、存在裂纹、蜂窝、麻面等质量问题区域。

在试块抽取的方式上，在混凝土中的含氯量可以运用现场根据混凝土的不同深度抽样，然后通过化学分析法来测定其含量，测定结果必须能够表现出氯离子在混凝土中沿深度的变化情况。分层取样一般以 5~10mm 来计算，由表及里地钻取粉末。对于拌合物的新鲜度检测，搅拌物应随机在同一搅拌车上采取，但是不能在第一台混凝土中抽取，取样要在卸料量为 1/4~3/4 之间进行。分层和随机同时进行则可以做到既高效又能保证样本代表性。

2.2 室内定量分析技术及其适用性

现有的混凝土中氯离子含量室内测定主要是三种路

径，硝酸银滴定法被认为是典型的化学分析手段，精确可靠，在工程验收过程中可作为仲裁的方法，它以 K_2CrO_4 作指示剂，用硝酸银标准溶液滴定到砖红颜色消失为止，具有低成本、仪器简单的优点，可用于测定各种样品中的水溶性及酸溶性氯离子含量，但耗时较长、操作技巧要求高；电位滴定法选用氯离子选择电极进行滴定测氯离子浓度，方便易操作。电位滴定以电位突跃代替颜色突变来判断滴定终点，减少了主观臆断造成的偏差，尤其适合测定颜色较深或者氯离子较低的样品。离子色谱法采用色谱分离手段准确测量氯离子浓度，适合复杂的试样。可以对几种阴离子进行联测，灵敏度较高，适合微小的分析以及研究工作，但是仪器设备购置成本比较高昂。见表 1 中三种检测方法的应用场合、不足之处。

表 1 混凝土氯离子含量检测方法比较

检测方法	核心原理	检测范围	适用场景	局限性
硝酸银滴定法	沉淀滴定反应	$\geq 0.005\%$	工程验收仲裁、各类样品	操作耗时，人为影响大
电位滴定法	电极电位突跃	$\geq 0.001\%$	现场快速筛查、批量样品	需定期标定，维护要求高
离子色谱法	色谱分离检测	$\geq 0.0001\%$	微量分析、科研测试	仪器昂贵，前处理繁

施工现场应该把现场快速检测与实验室标准方法相结合，快速检测仪适合进行现场粗略检验，但是最后的确认应该采用滴定法。

3 钢筋锈蚀状态检测与评价方法

3.1 钢筋锈蚀的电化学基本原理

钢筋混凝土中钢筋锈蚀实质上是一种包括了阳极与阴极过程的电化学腐蚀，阳极部位的铁离子被氧化成亚铁离子，同时在阴极处溶解在水中的氧气获得电子变成氢氧根离子，在钢筋表面材质的不同和附近周围混凝土的微小环境不同使得钢筋周围产生了大量的小而分散或者大而集中的腐蚀微电池，在钢筋内部混凝土内钢筋发生的锈蚀基本上都是以电化学腐蚀的形式表现出来，钢筋的锈蚀主要是靠混凝土来传递电子。由此可知所有的电化学方法都是用检测电位差值，测量电流强度大小，测定电阻变化的方式得到的钢筋锈蚀程度信息。

3.2 无损检测技术及其判别指标

无损检测是目前比较常用的检测钢筋锈蚀状况的方法。半电池电位测法就是以测得钢筋与参比电极之间的电压作为钢筋锈蚀状况的一个标志，可以迅速判定出钢筋是否存在锈蚀情况，电压越低表明可能存在的锈蚀程度越高，在现场进行大面积普查的时候使用较多。通常用铜/硫酸铜电极来进行测量。操作简单方便。根据 JGJ/T 152-2019

《混凝土中钢筋检测技术标准》的规定,对于半电池电位大于 -200mV 时,基本不会产生锈蚀,概率为90%以上;当电位处于在 $-200\sim-350\text{mV}$ 之间的情况时,锈蚀状况无法确定;当电位小于 -350mV 的情形下,有锈蚀发生的概率超过90%,这种判读规则是最常用的规则之一,在实际对桥梁检测的过程中也最为多见。线性的极化电阻检测采用低幅的极化电流进行钢筋的极化电阻的测量从而得到腐蚀速率,可以量化地对腐蚀情况进行评价,适合长时间监控以及准确判断。通过小的电位激励来获得极化电阻,再转换成腐蚀电流密度 i_{corr} 通过 Stern-Geary 公式来求解。当 i_{corr} 小于 $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 的时候就说明钢筋已经发生钝化了,在 $0.1\sim 0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之间是低到中度的腐蚀速率,在大于 $1.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 的时候就是高强度的腐蚀速率需要采取相应的处理措施了。混凝土电阻率检测也是一个重要的参考指标。混凝土的电阻可以在通过四个测试电极的方法来进行阻抗测试。当电阻率达到 $12000\Omega\cdot\text{cm}$ 以上基本不会发生锈蚀现象,当电阻率小于 $5000\Omega\cdot\text{cm}$ 就容易造成严重锈蚀的现象了。电阻率体现了混凝土离子传导性的大小,由此可以推测出钢筋锈蚀环境的严峻性。

3.3 破损检测与锈蚀量实测评定

破坏检验是最直接了解钢筋实际锈蚀情况的方法主要有破型检验与失重法两部分组成。破型检验是通过破坏混凝土保护层直接观察暴露出来的钢筋,对锈蚀的形状大小、占总面积百分比、最深坑蚀处进行测量等。失重法则是利用钢筋锈蚀后平均重量损耗程度来反映腐蚀的程度,此法较精确但是费时较多,在实验环境中进行,去除锈层后称量其重量损失比率以及截面损失比率^[3]。国家标准 GB/T 46613-2025 中规定的两种钢筋锈蚀测定方法有:A方法即为三维激光扫描法,用钢筋锈蚀后的截面变化来表示腐蚀程度;B方法即为失重法。该标准对以氯化物为主要侵蚀环境下的钢筋锈蚀检测评定进行了系统的规定,有重要的工程意义。

3.4 锈蚀程度分级与评价标准

对钢筋锈蚀程度分类是把检测数据同桥梁的安全等级联系起来的重要步骤,可以从三个方向展开:即电化学指标、物理损伤指标以及力学退化指标方面考虑。在半电池电位分类标准下,电位大于 -200mV 代表锈蚀几率为5%; $-200\sim-350\text{mV}$ 代表锈蚀几率为50%,有可能发生坑蚀现象; $-350\sim-500\text{mV}$ 代表锈蚀几率为95%。锈蚀电流密度可以分为 $i_{\text{corr}}<0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (钝化状态)、 $0.1\sim 0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (低锈蚀率)、 $0.5\sim 1.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (中等锈蚀率)、 $>1.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (高锈蚀率)。物理损伤方面主要检查四个方面的情况:

保护层裂缝以及裂缝宽度,钢筋截面损失率(损失小于5%不影响结构强度,损失介于5%~10%之间需要根据受力情况考虑,损失超过10%安全储备大幅度下降)坑蚀的最深距离和直径之比,粘结退化的程度如何影响构件延性和锚固性能。

4 氯离子-锈蚀关联分析与桥梁耐久性评价

4.1 氯离子临界浓度与锈蚀启动判据

临界氯离子含量为相关性的最关键指标,直接影响了耐久性寿命估算中的锈蚀起始时刻判断。依据《公路桥梁承载能力检测评定规程》,可以依据钢筋部位混凝土内氯离子含量来评价它对钢筋锈蚀的作用大小。临界氯离子含量一般以其相对于胶凝材料的质量百分比或者相对于混凝土的质量百分比来表示,与配合比、胶凝材料种类、温湿度、钢筋种类等相关因素有关^[4],临界氯离子含量研究的结果有较大的区别。粉煤灰、矿渣等矿物掺合料能增强氯离子吸附性能,导致表面临界值上升,同时有可能下降孔隙液的pH值,从而削弱钝化层的耐久性。

4.2 氯离子分布与钢筋锈蚀时空关联

氯离子存在于混凝土中的分布有明显的空间分布梯度以及时间变化趋势,在空间上由外到内一般遵守 Fick 的第二级扩散定律递减,桥面板受到除冰盐单方向侵蚀,墩柱浪溅区由于干湿循环造成表层累积,海洋环境潮湿,使得氯离子随液态不断向内扩散。对于不同的钢筋类型临界氯离子浓度分布有所不同,在检测过程中要加以区别对待。

时间方面,随服役年限的增长,氯离子扩散前沿逐渐向前移动,钢筋表面浓度缓慢积累,当达到一定量的时候开始锈蚀,锈胀力使保护层开裂,裂纹产生之后氯离子以及水迅速进入钢筋表面进行加快锈蚀的过程,形成一个循环。了解氯离子的空间及时间上的变化过程可以用来预测锈蚀风险及发展趋势。

4.3 桥梁构件耐久性综合评定方法

公路桥梁结构耐久性综合评价需应用多层次的多指标分析。第一个层次是对环境作用等级的评价,在此基础上判定出氯盐侵蚀严重程度等级。第二个层次是对材料性状指标的评价,包括氯离子含量及其分布情况、电阻率值大小、碳化深度状况以及保护层厚度等等。水胶比越大则孔隙也就越开放连通,使得氯离子的扩散速度加快,在密实度不够的情况下会使渗透性强起来,从而使得抵抗侵蚀的能力下降。第三个层次是对钢筋腐蚀状况指标的评价,通过对半电池电位值、锈蚀电流密度水平、锈蚀覆盖率大小还有截面损耗百分数等方面进行评判。

建立加权评分法计算综合评价模型,将氯离子含量、

保护层厚度及电阻率、碳化深度、半电池电位、锈蚀电流密度六个因素列为一组指标,分别进行五分制打分之后累加得到总分值,进而将构件的耐久程度分为良好、轻微劣化、中等劣化、严重劣化以及危险五个级别^[5]。可以体现氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀危害的同时也可以考虑现有的锈蚀对于结构安全性的影响。

4.4 检测评价成果在养护决策中的应用

开展砼结构耐久性的检测和评估,能预报公路寿命,并为未来公路桥涵维护加固提供依据。检测评估结果转化为养护决策的方式有:第一,在氯离子扩散方程及实测氯离子含量基础上计算出钢筋表面氯离子达到临界含量时间,提出预防性养护措施。在锈蚀尚未开始时可运用涂覆渗透性防锈剂、表面封堵涂层以及阴极法等一系列主动式的养护手段;阴极法是在钢筋受到氯离子侵害之前给予较小的保护电流密度使得钢筋电位低于点蚀电位而不产生点蚀现象。第二,根据腐蚀评估结果区分桥梁结构物类型,采取不同的维护措施:腐蚀可能性小的结构物进行正常的巡查^[6];存在腐蚀可能性的结构物加大监控力度并提出相应的预防措施;已经腐蚀但不影响安全使用的结构物进行修复和防腐蚀工作;腐蚀严重威胁安全使用的结构物应及时修复或者更换等。第三,在桥梁养护管理系统中集成耐久性测评成果,形成“一座桥一份档案”的耐久性数字化档案,便于长期保存检测信息以及跟踪监测耐久性能的变化情况,支持桥梁群的全生命周期管理决策。

5 结束语

氯离子侵蚀导致的钢筋锈蚀是公路桥梁混凝土结构耐久性退化的最主要因素,而氯离子含量测定及钢筋锈蚀

状况评估为耐久性鉴定提供了两项关键技术支持。文中概述了氯盐腐蚀环境种类以及脱钝锈蚀机理,整理出取样分布方式及实验室测试手段,分析了电化学无损检查及破坏性检测方法的优点及其适用情况,制定了锈蚀等级评定准则,并从临界值、时间关系、总体判断以及维护使用等方面形成了氯离子-锈蚀联系分析体系。今后要着力于建立适合各类环境各种材料系统的临界氯离子浓度概率分布函数,研究多种变量综合的腐蚀精准评估技术,开发智能实时监控报警装置以及完善从检测到评估再到预报预测最终做出决策的一系列标准,以期为公路桥梁的耐久性管理和合理维护提供全方位的技术保障。

[参考文献]

- [1]苏丽惠.基于混凝土氯离子含量的检测方法[J].中国建筑金属结构,2023(12).
- [2]林宜光.氯离子侵蚀环境下桥梁混凝土构件耐久性评价与寿命预测研究[J].运输经理世界,2023(31):104-106.
- [3]朱甲成.既有结构混凝土中氯离子含量分析[J].工程技术研究,2023(22).
- [4]郑辉,刘慧芬,何向荣,等.华南地区通明海特大桥混凝土结构耐久性设计[J].腐蚀与防护,2023(2).
- [5]欧阳京亚.考虑氯离子侵蚀的桥梁时变可靠度分析[J].湖南交通科技,2023(2).
- [6]田浩浩.氯盐浓度与循环荷载对道路混凝土氯离子传输影响研究[J].福建建设科技,2023(1).

作者简介:胡志成(1993—),毕业于中国石油大学(华东)土木工程专业,中级工程师,现就职于新疆北新科技创新咨询有限公司。