

公路桥梁碳化深度检测与耐久性分析研究

鲁振星

新疆北新科技创新咨询有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]混凝土碳化是威胁公路桥梁结构耐久性的主要因素,而碳化引发的钢筋锈蚀则直接影响着桥梁使用寿命的安全性,文章详细阐述了几种常用的碳化深度测试手段,即酚酞试剂法、钻芯取样法、无损探伤等方法;围绕钢筋锈蚀、混凝土裂缝以及碳化给结构带来的危害性变化以及桥梁耐久性评定方式四个方面进行探讨,指出了目前碳化深度检测存在的代表性不够、环境影响大和碳化界面难以判定等问题,提出了一些提高桥梁耐久性的措施如选用耐候材料、改变施工方式、养护管理等,以供公路桥梁碳化检查和耐久性评估参考。

[关键词]公路桥梁;碳化深度;耐久性;酚酞试剂法;钢筋锈蚀

DOI: 10.33142/ec.v9i6.19831

中图分类号: U448.7

文献标识码: A

Research on Carbonization Depth Detection and Durability Analysis of Highway Bridges

LU Zhenxing

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

Abstract: Concrete carbonation is the main factor threatening the durability of highway bridge structures, and the corrosion of steel bars caused by carbonation directly affects the safety of bridge service life. This article elaborates on several commonly used carbonation depth testing methods, including phenolphthalein reagent method, core drilling sampling method, non-destructive testing, etc; This article discusses the harmful changes caused by steel corrosion, concrete cracks, and carbonation to structures, as well as the evaluation methods for bridge durability. It points out the problems of insufficient representativeness, significant environmental impact, and difficulty in determining carbonation interfaces in current carbonation depth detection. Some measures to improve bridge durability are proposed, such as selecting weather resistant materials, changing construction methods, and maintenance management, for reference in highway bridge carbonation inspection and durability evaluation.

Keywords: highway bridges; depth of carbonization; durability; phenolphthalein reagent method; reinforcement corrosion

引言

桥梁在长期使用过程当中,空气中的二氧化碳不断地扩散到混凝土里面去,与水泥中的水化产物氢氧化钙进行化学作用形成碳酸钙、水,混凝土孔隙溶液的 pH 从 12~13 降低到小于 9,这个过程叫作混凝土的碳化,在碳化过程中钢筋表面的碱性保护层被破坏而产生电化学反应,造成混凝土强度降低的现象,称为混凝土碳化。混凝土碳化是指二氧化碳和氢氧化钙相互作用生成碳酸钙和水的化学作用过程,这个反应导致了混凝土的碱度下降,是导致钢筋去钝的主要因素之一。由于我国公路桥隧服役年限较长,由碳化导致的耐久性问题也越来越严重,在此基础上进行的耐久性分析也成为公路桥梁养护管理工作的一项重要工作内容。根据《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476-2019)中环境分类原则来划分环境类别并确定碳化、

氯离子渗透作用等级等。在此基础上对碳化深度检测方法进行了系统的归纳总结,并对碳化对桥梁结构耐久性影响机理进行了详细的讨论,进而提出了系统的质量控制及改善措施,以期能对公路桥梁碳化检测与耐久性评价提供相应的技术支持。

1 公路桥梁碳化深度检测方法

1.1 酚酞试剂检测法

酚酞试剂检验法是公路桥隧工程现场混凝土碳化深度检验最为常用、方便快捷的一种方法,原理如下:酚酞遇碱性混凝土($\text{pH}>9$)变红色,遇碳化混凝土($\text{pH}<9$)不变色,根据颜色变化的位置来判断混凝土的碳化程度;检测时对混凝土构件钻取直径约为 15mm,深度为 50mm 左右的圆孔,清理孔内残渣,然后用喷嘴向孔内喷洒配置好的 1%酚酞酒精溶液,大约 30s 后用量筒量取孔内液高

并用游标卡尺从液面最高处量取到孔壁红色与无色交界处的高度,这个高度就是该点的碳化深度。其优点在于操作简便、费用低廉(单项检测费用大约为5元/点),在检测过程中应对被检构件的不同位置选择检测点,最后以各点碳化深度的平均值进行评定。针对某一桥梁墩柱检测来看,运行10年之后墩柱下部出现了28mm的碳化程度(设计保护层厚度为30mm),而上部却只有12mm,由此可以得出结论是下部由于长期处于潮湿环境中发生碳化的速度更快。

1.2 钻芯检测法

钻芯检测法是对混凝土构件钻取芯样,在试验室条件下对芯样进行加工,使用指示剂检验法准确测定出碳化层深度。通过钻芯检测能获得更精确的碳化深度值以及能获取芯样用以混凝土抗压强度等其他物理性质的鉴定,但是此方法操作较繁琐且有损结构,不过它得到的结果最直观最可靠,通常用于其他方法检测结果的复核参照标准。在钻芯过程中要注意避开受力主钢筋及预应力筋的位置,芯样的直径不得小于75mm,切完之后要保证检测表面平滑^[1]。对于桥梁重要受力区段以及有争议的检查区段是无法用其他方法代替钻芯法的验证作用的。

1.3 无损检测技术

随着检测手段的进步,很多种无损检测方法用于混凝土碳化深度检测,在声波检测中采用超声波检测法,基于碳化层和非碳化进程传播速度不同来反推碳化深度,红外热像法使用红外技术测定碳化层和非碳化进程间的温度变化,雷达波法用雷达波测定电磁波波速变化来反求碳化深度,电磁波由雷达天线发射,中心频率为1GHz,碳化区波速约为 1.2×10^3 m/s,非碳化进程约为 1.5×10^3 m/s,电磁波检测速度快,覆盖面大,不会损害结构,但是需要工作人员有经验,检测结果也需要钻孔取样对比。

1.4 碳化深度检测流程

标准化的碳化深度测定程序为获得精确可靠的结果提供前提保障。测定之前须先明确测验的目的以及测定区域范围,在桥梁类型不同、使用期限长短、环境差异的情况下合理安排测区数目和测定点的位置。依照《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21-2011),对桥体缺损情况进行检查,对材料状况及物理指标测量,进而计算结构强度,并视需要开展加载测试来判定桥梁承载能力。检测中,酚酞溶液测量需等颜色固定之后再读取数值,钻芯过程中也需在室内做打磨、清洗、烘干工作。混凝土碳化深度检查参照的是GB50204和GB/T50082等相关的国家标准来进行的,检查结束后会对得到的数据进行分析,

统计出各个测点的碳化深度均值,结合构件的设计保护层厚度与碳化率来预测未来的进展情况,给桥梁耐久性评定做准备。

2 公路桥梁耐久性分析

2.1 钢筋锈蚀分析

钢筋锈蚀是混凝土碳化的第一代耐久性损伤。混凝土碳化以后的保护层会丧失碱性,钢筋钝化膜破裂,通过氧气和水的作用导致电化学腐蚀。腐蚀产品的体积能扩大到原来钢筋体积的2~6倍,产生的推力将使混凝土保护层产生裂缝乃至掉落。钢筋腐蚀包括氯离子腐蚀和碳化腐蚀两大类。混凝土钢筋半电池电位检测按ASTMC876-15标准来进行。钢筋锈蚀情况随着碳化的加深而恶化,在碳化的前端一旦超出保护层范围则开始脱钝并进入一个快速的腐蚀过程。影响腐蚀电流密度变化的因素主要是湿度,温度对它变化的影响较小;而对于低含水量条件下,则会使钢筋锈蚀速率增大,在对桥梁耐久性能检验方面,则是通过使用半电池电位法来测定钢筋锈蚀电位及与混凝土电阻率一起作为判断钢筋锈蚀活性的重要依据。

2.2 混凝土裂缝分析

混凝土裂缝与碳化有相辅相成的作用。裂缝是大气中CO₂水以及侵蚀性离子得以进入混凝土最便捷的途径,加快了碳化的前缘向混凝土深处推进的速度,公路桥梁工作环境恶劣复杂,受到氯盐侵蚀、碳化反应、冻融破坏及复合化学腐蚀等都会使混凝土发生迅速破损,大大危害了桥梁的安全性和持久性。裂缝愈宽、愈深,则混凝土的碳化速度也愈快。一旦产生裂缝,碳化不仅仅是沿构件表面向里发展,而且还会沿裂缝两侧同时向混凝土体内扩散,造成局部急剧碳化的危险情形^[2]。裂缝宽度检测需要使用裂缝宽度量测仪或是读数显微镜等仪器,裂缝深度检测可以使用超声法或者冲击法,结合裂缝分布特点分析其影响桥梁结构耐久性的大小。

2.3 碳化对结构性能的影响

碳化对混凝土结构性能的影响主要表现在材料方面和结构方面两个方面。碳化会使混凝土的抗压强度和弹性模量下降,在碳化区与未碳化区连接的地方由于膨胀系数的不同可能会存在微裂缝,同时碳化也使混凝土的抗压强度有所增加,但碳化对混凝土的强度提高不大;碳化会使混凝土的延性差,碳化的深度越大其脆性就越大,碳化前的弹性模量、割线模量、峰值应力都会上升,但是峰值应变却减少了很多,碳化速度是由二氧化碳的浓度、相对湿度、水灰比、材料成分等决定的。水灰比与混凝土碳化深度呈线性相关,水泥用量与混凝土碳化深度呈反比相关,

相对湿度与混凝土碳化深度呈二次曲线式的关系。由于碳化的发展使得钢筋截面的有效面积逐渐减少,钢筋与混凝土间的握裹力降低,在一定程度上降低了结构的承载力、抗疲劳能力。从结构性能演变情况来看,当碳化深度达到保护层厚度以上时,桥梁已开始出现加速恶化现象,进行碳化深度测试及耐久性能测定对于保障结构安全具有十分重要的作用。

2.4 桥梁耐久性评价方法

对于桥梁耐久性的评价主要是以混凝土碳化程度、钢筋锈蚀情况以及裂缝发展状况等为主要参数进行判定。通过《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21-2011)中的缺损情况、结构材料强度、混凝土碳化水平、钢筋锈蚀状况等来评估承载能力。在检测过程中,先从桥梁的缺损程度、材料强度、混凝土碳化程度、钢筋锈蚀程度等方面着手分析,然后采用承载力检算系数、承载力恶化系数等方式对设计值加以调整。为了方便在实际工作中对由于碳化导致的耐久性损伤等级作出判断,在这里整理了关于碳化深度与保护层厚度比有关联的耐久性的级别以及养护措施等内容,如表1所示。

根据等级划分,对于碳化损伤构件进行分层处理:对于微弱级别的,在规定的检查时间内一般情况下进行定期检查,加强保护就行;中等级别需要在规定的检查时间里加强对碳化速度变化的关注,在规定的检查时间里重点对碳化速度的变化进行关注;比较严重的,要进行全面检查并对是否需要采取措施做出判断;严重级别必须及时对结构进行加固补强。如果碳化的前端超过了保护层厚度的范围,则还要对超过的部分涂抹渗透性的防锈液。碳化性能耐久性评估应该综合考虑该桥所处环境的危害程度以及桥梁结构的重要性来作出决定。

3 公路桥梁碳化深度检测中的常见问题

公路桥梁碳化深度检测中常有诸多导致检测准确率较低、可靠性较差的问题出现。首先便是取样的代表性差。桥梁各部位服役环境差别很大,迎风面与背风面、桥墩底

部与顶部因湿度、温度以及二氧化碳含量不一样,其碳化程度有较大的区别,如果取样位置过于密集或者随机选择就会使检测结果不能够代表整个桥梁的碳化情况。其次就是检测环境以及人员操作对碳化的辨识影响非常大,使用酚酞溶液喷涂量大小,观察时间段长短,判断时间的选择都会影响颜色分界线是否清楚明确,而关于碳化边界的主观判定也会存在一定的偏差。最后则是没有针对碳化速度进行一个总结归纳。一次检测只能得到碳化的深度值,不能准确预测出碳化程度的发展趋势以及钢筋腐蚀的风险。第四是没有损伤检验方法的应用推广还存在问题^[3]。热红外成像技术、雷达波技术等对检测人员的技术水平有较高的要求,在实际应用当中还需要结合钻芯取样的方式进行验证。另外一些桥梁检查只是注重了碳化深度数值而不考虑同时复核检测保护层厚度的情况,使得判断是否有钢筋腐蚀的风险不够全面,应该引起检测过程中的重视进行调整。

4 公路桥梁耐久性提升措施

提高公路桥梁耐碳性能要从材料选择、施工技术和运营管理三个方面全面考虑。从材料选择方面来说需要选择低水化热低渗水性水泥以及合理地添加一定的粉煤灰及矿渣粉来改善混凝土孔隙率,调整水胶比以及增大混凝土的密实度。对于东莞至深圳高速公路扩建工程中出现混凝土碳化严重的质量问题,项目部组成专门的QC小组,利用PDCA循环法对材料进行调配以及提升浇筑养护工艺,从而使得混凝土碳化深度降低了40%以上。在施工技术上要加大混凝土的振捣力度,保证保护层垫块的位置正确和间距恰当,同时要在浇筑后及时做好充分湿润养护。在青海海西公路总段2025年桥涵修复养护工程里,在使用了渗透型防碳化涂料之后,深入混凝土表面的空隙内部进行发生化学反应生成凝胶类物质来精确填补并且封堵住空洞通路,而在运行维护方面应当对于桥梁重要位置定期进行测试,观察到碳化的进展状况^[4];针对已经碳化达到或者接近保护层厚度的构件要立刻对其进行涂抹一层混凝土抗碳化层以阻止二氧化碳以及水汽渗入。形成一个以

表1 公路桥梁混凝土结构碳化耐久性评价等级

碳化深度与保护层之比	耐久性等级	碳化状态描述	钢筋锈蚀风险	建议维护措施
$d_c \leq 0.5$ 倍保护层	I级(轻度)	碳化前沿未接近钢筋	低(钢筋仍处于碱性保护状态)	正常检测,必要时进行表面防护
$0.5 \text{ 倍} < d_c \leq 0.8$ 倍保护层	II级(中度)	碳化向钢筋方向持续进展	中等(需重点关注)	加密碳化深度测点频率,检测钢筋锈蚀电位
$0.8 \text{ 倍} < d_c \leq 1.0$ 倍保护层	III级(较严重)	碳化前沿接近或接触钢筋	较高(钢筋开始脱钝)	构件全面耐久性检测,评估是否需要补强或防腐处理
$d_c > 1.0$ 倍保护层	IV级(严重)	碳化深度超出保护层厚度	高(钢筋已进入快速锈蚀期)	抓紧实施加固补修,修复破损混凝土以及涂抹渗透型防锈剂,必要时进行结构加固。

大数据、智能化检测为基础的桥梁耐久性能动态档案库,通过对数据的分析来调整养护费用支出比例、修缮加固计划等,由解决目前存在的碳化现象逐步转向预判并遏制碳化的蔓延程度。

5 结语

公路桥梁碳化深度检测与耐久性评估是公路桥梁安全管理的一项核心技术工作。桥梁结构混凝土碳化导致失碱从而降低了对于钢筋的防护能力,是造成桥梁耐久性降低的一个重要因素。本文全面阐述了酚酞溶液法、钻孔检测法以及无损检测方法的技术特性,解析了由于碳化引起的钢筋锈蚀机理、裂纹延伸趋势及材料性质变化规律,并对耐久度评估方法进行了归纳,指出了检测中存在的不足之处及其改善策略,最终得到如下结论:实际工程中宜采用酚酞溶液法快速筛查,重点区段采用钻芯检验法校验准确性,在此基础上结合桥梁服役条件以及结构形式选择适当的无损检测手段。耐久性研究要围绕着碳化速度与深度与保护层比例作为核心指标进行分级检测评估并提出相应的修补措施,采取材料升级、改善浇筑养护方法、定期检测以及表面防护等多种方式相结合的技术路线可以从根本上降低碳化的速度、提高桥梁构件使用年限;如选择

合适的矿物掺合料、精确控制好保护层厚度、把握好碳化情况的发展状况及时做好相应的维护工作等,碳化耐久性评定还需要依据桥梁的环境影响程度以及结构的重要性级别来确定相应的维护重点,新旧工程同时开展高质量的材料设计和标准化的施工养护。伴随着无损检测向智能化传感器发展以及智能监测技术的发展,多参数同步检测及基于大数据的耐久性管理必将会大大改善桥梁工程全生命周期内的服役安全性及运维效率。

[参考文献]

- [1]徐新广.可持续理念下公路桥梁施工管理的低碳化策略与理论依据[J].中国公路,2026(1):108-110.
- [2]白生天.公路桥梁混凝土结构耐久性分析与改进[J].运输经理世界,2025(17):73-75.
- [3]曾杰.桥梁钢筋腐蚀检测方法探讨[J].交通科技与管理,2025,6(16):146-148.
- [4]王宝峰,王文龙.公路桥梁钢筋锈蚀的原因及防治研究[J].全面腐蚀控制,2024,38(7):71-73.

作者简介:鲁振星(1974—),毕业于西南大学土木工程专业,中级工程师,现就职于新疆北新科技创新咨询有限公司。