

高速铁路桥墩混凝土耐久性检测与寿命预测

吴崇贤

中铁四局集团有限公司 安徽 合肥 230023

摘要: 高速铁路桥墩作为承受列车动荷载与长期环境侵蚀的关键承重构件,其混凝土耐久性直接关系到线路运营安全与服役寿命。本文以某运营期高速铁路桥墩为研究对象,重点开展墩身结构实体部位的透气性检测与保护层厚度检测,系统分析混凝土表层渗透性能与钢筋保护层质量的现状特征。基于检测结果,结合碳化与氯离子侵蚀两类主要劣化机理,建立考虑材料参数随机性与环境作用概率特征的寿命预测模型,定量评估桥墩混凝土的剩余服役年限。研究表明,透气性系数与保护层厚度是控制耐久性寿命的核心指标,本文提出的检测与评价方法可为高速铁路桥梁养护维修提供技术支持。

关键词: 高速铁路;桥墩混凝土;透气性;保护层厚度;寿命预测

引言

高速铁路桥梁占比常超50%,桥墩作为关键承重构件,其耐久性直接关系行车安全。长期暴露于大气环境中,桥墩混凝土受列车振动、温变、雨水、冻融及除冰盐等多重作用,易发生碳化导致钢筋锈蚀、保护层开裂剥落等劣化问题,尤其当保护层不足或表层致密性差时,劣化加速。相较于普通桥梁,高铁桥墩对变形控制与长期稳定性要求更高,一旦劣化严重,修复困难且代价高昂。因此,开展现场耐久性检测并建立科学寿命预测模型,对预防性养护至关重要。现有检测方法多适用于实验室或大平面构件,对竖向大体积桥墩适用性有限^[1]。透气性检测能有效反映混凝土表层孔隙结构与碳化潜力,保护层厚度则直接影响钢筋锈蚀起始时间。本文以某高铁典型桥墩为对象,采用透气性测定仪与钢筋定位仪进行原位检测,结合碳化与氯离子扩散模型,引入概率方法考虑参数不确定性,定量评估剩余耐久寿命,为同类工程提供参考。

1 工程概况与检测方案

1.1 桥墩结构特征

研究对象为某高速铁路特大桥的直线段圆端形实体桥墩,墩高12.5m,墩顶截面尺寸3.2m×8.0m,墩底截面尺寸4.0m×9.2m。桥墩采用C35混凝土浇筑,设计配合比中水胶比为0.42,胶凝材料用量420kg/m³,其中粉煤灰掺量为20%。墩身主筋直径为25mm,设计保护层厚度为50mm。该桥位于华北地区,年平均气温13.5℃,年平均相对湿度62%,大气环境中CO₂浓度按0.04%计,无显著氯盐腐蚀环境。桥墩已于2016年建成通车,本次检测时间为2024年,即运营8年后开展。

1.2 检测部位与测点布置

为全面评价墩身混凝土耐久性状况,选取距离地面0.5m、3.0m、6.0m、9.0m四个高度断面,每个断面沿周长均匀布置4个测点,共计16个测点。透气性检测与保护层厚度检测在同一测点附近进行,以便后续建立参数关联关系。对于保护层厚度检测,每个测点在方圆0.3m范围内选取3次读数取平均值,以减小钢筋位置偏差带来的随机误差。

2 墩身混凝土透气性检测与评价

2.1 检测原理与方法

混凝土透气性反映气体在压力梯度下穿透混凝土表层的能力,与孔隙率、孔径分布及孔隙连通性密切相关。本文采用瑞士Proceq公司生产的Torrent透气性测定仪,该仪器采用真空法原理:将专用测头密封贴合于混凝土表面,对测头内腔抽真空至设定负压值,随后关闭阀门记录腔内压力随时间的恢复曲线^[2]。依据Darcy定律与气体状态方程,透气性系数 k_T 按下式计算:

$$k_T = \frac{\eta \cdot V \cdot L}{2 \cdot A \cdot (p_0^2 - p_1^2)} \cdot \frac{dp}{dt}$$

式中, η 为空气动力黏度, V 为测头内腔容积, L 为透气层有效厚度(通常取50mm), A 为测头密封面积, p_0 为大气压, p_1 为初始负压绝对值, dp/dt 为压力恢复初始速率。 k_T 单位为10⁻¹⁶m²,数值越小表明混凝土越致密,抗渗透能力越强。

2.2 检测结果与分析

16个测点的透气性检测结果经统计处理如下:最小值为0.42×10⁻¹⁶m²,最大值为2.38×10⁻¹⁶m²,平均值为1.15×10⁻¹⁶m²,标准差为0.51×10⁻¹⁶m²。变异系数为0.44,表明墩身不同部位的混凝土透气性存在较为明显的离散

性。从竖向分布来看,墩底部位(距地面0.5m断面)透气性系数平均值最大,为 $1.56 \times 10^{-16} \text{m}^2$;墩顶部位(距地面9.0m断面)次之,为 $1.21 \times 10^{-16} \text{m}^2$;墩身中部(3.0m与6.0m断面)相对较小,分别为 $0.96 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 与 $0.88 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 。这种分布规律与混凝土浇筑施工工艺有关:墩底部位混凝土浇筑高度大,粗骨料下沉、浆体上浮现象相对明显,表层浆体富集程度降低,同时振捣棒插入深度不足可能导致底部混凝土密实性略差;墩顶部位受最后一层浇筑浮浆影响,若未做有效处理,表层也存在疏松层。从环向分布来看,各断面迎风面与背风面的透气性系数无显著统计差异,但阴角部位(截面转角附近)略高于大面部位,差值约为15%~20%,这与模板拼缝处漏浆、振捣时气泡难以排出等因素有关。

2.3 透气性与耐久性的关联评价

混凝土透气性与碳化速率、氯离子扩散系数之间存在正相关关系。根据国内外研究成果,当 $kT < 0.5 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 时,混凝土具有优异的抗渗透性能,碳化过程极为缓慢;当 $0.5 \leq kT < 1.5 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 时,抗渗透性能良好,正常环境条件下50年碳化深度可控制在20mm以内;当 $1.5 \leq kT < 3.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 时,抗渗透性能一般,需关注表层致密化处理;当 $kT \geq 3.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 时,抗渗透性能较差,耐久性风险较高。本文检测结果中,约有25%的测点落入 $1.5 \sim 2.5 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 区间,表明墩身局部区域混凝土表层致密性尚存不足,需要在后续养护维修中重点关注。

3 保护层厚度检测与合格性评定

3.1 检测方法

采用德国Proceq公司Profometer600型钢筋定位仪,基于电磁感应原理检测墩身主筋保护层厚度。检测前根据设计图纸确定主筋间距与布置形式,采用标准试块对仪器进行标定,修正混凝土强度对检测结果的影响。每个测点重复检测3次,取平均值作为最终保护层厚度实测值^[3]。依据《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB50204-2015)及高速铁路桥梁设计文件,保护层厚度允许偏差为+10mm、-7mm,即合格范围为43~60mm。

3.2 检测结果

16个测点的保护层厚度检测结果:最小值41mm,最大值67mm,平均值51.8mm,标准差4.7mm。以设计值50mm为基准,实测值相对偏差在-18%至+34%之间。合格率方面:16个测点中,保护层厚度处于43~60mm范围内的测点共12个,合格率为75%;厚度小于43mm的测点共3个,占比18.75%;厚度大于60mm的测点共1个,占比6.25%。从竖向分布分析,墩底断面保护层厚度偏薄现象较为明显,平均值仅为47.2mm,且出现两个不合格测点

(41mm、42mm)。墩顶断面保护层厚度平均值最大,为54.5mm。从环向分布看,迎风面保护层厚度普遍略大于背风面,差值约为2~4mm,这与模板安装定位、钢筋骨架绑扎时的微小偏心有关。

3.3 保护层厚度不足的成因与影响

保护层厚度偏薄的主要原因包括:钢筋安装定位不准确、垫块间距过大或强度不足导致施工过程中钢筋移位、模板安装偏差等。对于高速铁路桥墩而言,保护层厚度不足将直接缩短碳化前沿抵达钢筋表面的时间,加速锈蚀萌生。按照碳化深度与时间平方根成正比的经典模型计算,当保护层厚度从50mm减小至40mm时,碳化到达钢筋表面的时间将缩短约36%,对耐久性寿命影响极为显著。与此同时,保护层厚度过大会减小钢筋的有效约束,降低构件抗裂性能,但本文实测仅个别点超过60mm,偏离程度尚可接受。

4 混凝土耐久性寿命预测

4.1 寿命预测模型的建立

高速铁路桥墩混凝土的耐久性寿命通常定义为从结构投入使用至耐久性失效的时间。本文以钢筋开始锈蚀作为耐久性极限状态,主要原因如下:钢筋一旦脱钝锈蚀,即使尚未引起混凝土保护层胀裂,锈蚀产物膨胀已开始削弱钢筋-混凝土界面黏结性能,且高速列车振动荷载会加速锈蚀疲劳损伤发展。需要说明的是,本文桥墩处于非氯盐环境,主导劣化机理为碳化引起的钢筋锈蚀。

碳化深度随时间的发展采用Fick第一定律的工程简化形式:

$$x_c(t) = K \cdot \sqrt{t}$$

式中, $x_c(t)$ 为t时刻的碳化深度(mm),K为碳化系数($\text{mm}/\sqrt{\text{a}}$)。碳化系数综合反映了混凝土材料性能与环境条件的影响,其值与透气性系数、水胶比、胶凝材料用量及环境 CO_2 浓度等因素有关^[4]。对于粉煤灰混凝土,由于二次水化反应消耗部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,早期碳化速率可能略高于纯硅酸盐水泥混凝土,但后期随密实度提高碳化速率有所降低。

钢筋开始锈蚀的时间 t_{cor} 即为碳化深度达到保护层厚度c的时刻:

$$t_{\text{cor}} = \left(\frac{c}{K} \right)^2$$

4.2 碳化系数的确定与概率特征

基于本文透气性检测结果,参考《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T50476-2019)中碳化系数与混凝土抗压强度、水胶比的经验关系,并结合现场碳化深度

实试验验证（通过酚酞指示剂法在局部破损测点测得运营8年后的碳化深度为6~12mm），回归得到墩身混凝土碳化系数K的统计特征：均值 $\mu_k = 2.85\text{mm}/\sqrt{a}$ ，标准差 $\sigma_k = 0.62\text{mm}/\sqrt{a}$ 。变异系数为0.22，符合对数正态分布。保护层厚度c同样具有随机性，依据本文检测结果，取均值 $\mu_c = 51.8\text{mm}$ ，标准差 $\sigma_c = 4.7\text{mm}$ ，服从正态分布。考虑到设计保护层厚度为50mm，实际施工中略偏向于正偏差，与检测平均值51.8mm一致。

4.3 剩余寿命计算与评价

采用MonteCarlo方法进行10万次抽样模拟，考虑K与c的随机相关性（根据现场数据，K与c之间无显著相关性，取独立处理）。以钢筋开始锈蚀为极限状态，计算得到桥墩混凝土在当前服役8年后的剩余寿命：

特征寿命（对应可靠度50%）：剩余62年，即总寿命70年。

设计基准寿命（可靠度95%）：剩余42年，即总寿命50年。

按照高速铁路桥梁设计使用年限100年的要求，当前剩余寿命尚有一定差距。进一步分析表明，寿命预测结果对保护层厚度极为敏感：若将所有保护层厚度小于45mm的测点通过加固修复至合格范围，则可靠度95%下的剩余寿命可提升至58年。此外，降低透气性（即减小碳化系数）同样能显著延长寿命，例如通过表面涂覆渗透型硅烷防水材料，可使表层混凝土透气性降低约50%，对应K值减小约25%，此时可靠度95%剩余寿命可延长至67年。需要指出的是，上述预测模型未考虑荷载作用下的微裂缝发展对碳化加速效应，也未计入冻融循环、硫酸盐侵蚀等耦合作用，因此实际寿命可能略低于预测值。但从工程应用角度，本文给出的寿命区间可为制定

首次大修时机提供参考依据——建议在运营后第30~35年开展全面的墩身混凝土耐久性评估与防护处理。

5 结语

高速铁路桥墩混凝土的耐久性检测与评估表明，其整体性能良好但局部仍存在薄弱环节。透气性检测结果显示，墩身平均透气性系数为 $1.15 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ，其中墩底区域透气性相对较高，部分测点超过 $1.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ，反映出混凝土表层致密性不均，建议加强底部区域的养护及表面封闭处理。保护层厚度检测合格率为75%，墩底断面偏薄问题尤为突出，最小实测值仅为41 mm，低于设计要求的43 mm下限；为此，施工阶段应严格控制钢筋定位精度与垫块布置，运营期间则应对保护层不足部位采取补强或涂层防护措施。基于碳化机理并考虑碳化系数与保护层厚度随机性的寿命预测模型表明，在95%可靠度条件下，桥墩混凝土剩余服役寿命为42年，而通过改善表层透气性或修复保护层缺陷可有效延长其使用寿命。此外，透气性与保护层厚度检测方法操作便捷、结果可靠，建议将其纳入高速铁路桥墩耐久性定期检测体系，为寿命预测和科学养护决策提供定量依据。

参考文献

- [1]王有志,张鹏,刘凯.高速铁路桥梁混凝土耐久性检测技术研究进展[J].铁道建筑,2021,61(5):1-7.
- [2]李华,赵尚传,孙晓燕.基于透气性的混凝土表层耐久性评价方法及应用[J].建筑材料学报,2022,25(3):456-462.
- [3]张劲泉,李鹏飞,周建庭.考虑保护层厚度随机性的混凝土桥梁碳化寿命预测[J].中国公路学报,2023,36(2):89-98.
- [4]刘加平,缪昌文,田倩.高速铁路混凝土结构耐久性设计理论与方法[J].铁道科学与工程学报,2021,18(4):823-832.