

城市巡河道路结构耐久性评价及养护技术应用

宋宝义

(北京市朝阳区水利工程有限公司, 北京 100024)

摘要 城市巡河道路长时间处于水文波动和行车荷载的复合作用环境当中,其结构耐久性方面的问题十分突出。通过对巡河道路典型病害类型以及空间分布规律进行系统梳理,深入分析滨水环境下路基路面的劣化机理和多源耦合效应,构建包含路面结构状况、路基稳定性、排水系统功能与环境侵蚀强度四个准则层、共计12项指标的耐久性评价体系,采用层次分析法来确定指标的权重,进而建立五级综合评判模型。结合评价结果,系统地提出预防性养护、功能性修复与结构性加固这三类技术措施以及它们的适用条件,并且构建“检测—评价—决策—实施”的闭环智能管养体系,旨在为巡河道路全寿命周期的精细化管理提供技术参考。

关键词 巡河道路; 耐久性评价; 层次分析法; 养护技术

中图分类号: U418

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.18.032

0 引言

城市巡河道路属于堤防工程的附属设施,承担着防汛抢险通道和日常管理巡查双重功能^[1]。受滨水环境影响,其道路结构长期遭受干湿循环、化学侵蚀以及水力冲刷持续作用,再加上行车荷载周期性叠加,结构劣化速率明显高于普通城市道路^[2];现行城镇道路养护规范针对滨水环境下的耐久性评价和差异化养护决策缺乏针对性指导,致使实际管养工作存在评价标准模糊、养护介入时机滞后等问题。针对这些不足,系统开展巡河道路病害机理分析、耐久性评价体系构建以及养护技术集成研究,对提升城市堤防道路管养水平具有现实意义。

1 城市巡河道路病害特征与耐久性影响因素分析

1.1 巡河道路典型病害类型及分布规律

城市巡河道路由于同时具备防洪巡查和日常通行的功能,所以其病害类型具有显著的区域性和系统性特征^[3]。路面病害主要以纵向裂缝、横向裂缝以及网裂为主,其中纵向裂缝大多沿着路肩边缘发育,这与路基侧向约束不足以及差异沉降密切相关,横向裂缝则集中出现在温度敏感段,特别是在季节性温差较大地区的沥青混凝土面层发育得尤为显著。在空间分布上,病害呈现出明显的非均匀性,临水侧路段的坑槽、松散、剥落等损坏程度普遍比背水侧更严重,网裂与横向裂缝在轮迹带及温度敏感段集中发育,并且在涵闸、泵站等构筑物接头部位,因不均匀沉降引发的错

台与开裂问题尤为集中。在路基病害方面,滑塌与沉降多发生在堤顶路段的堤坡交接区,明显受到护坡稳定性的制约。从纵向分布规律来看,低洼积水段、渗水薄弱带以及土质突变段是病害的高发区段,表现出与地形地质条件的强相关性,为针对性养护分区提供了依据。

1.2 滨水环境下路基路面劣化机理

滨水环境形成了巡河道路结构劣化的特殊边界条件,其劣化机理涉及物理、化学和力学多个层面。在水分作用方面,河岸侧毛细水上升以及汛期短暂淹水会致使路基土含水率出现周期性波动,黏性土在干湿循环作用下产生体积变形,从而引发路基回弹模量衰减,进一步加剧面层疲劳损伤累积。在化学侵蚀方面,河水中的硫酸盐、氯离子等侵蚀性介质通过毛细渗透进入路面结构层,会对水泥稳定碎石基层产生硫酸盐侵蚀,造成钙矾石膨胀开裂,降低层间结合强度。对于沥青混凝土面层而言,水分的侵入会削弱沥青与集料间的黏附力,在行车荷载反复作用下加速水损害进程,表现为剥落与松散^[4]。护坡渗漏引发的潜蚀作用可在路基内部形成渗流通道,导致细粒土流失,造成路基局部空洞与沉降,该过程具有隐蔽性强、发展速度快的特点,是滨水路段结构突发性损坏的主要诱因之一。

1.3 耐久性影响因素的多源耦合效应

巡河道路耐久性退化是多源荷载与环境因素耦合作用的综合结果。交通荷载与环境作用的叠加是核心

作者简介: 宋宝义(1982-),男,本科,助理工程师,研究方向: 水利工程。

耦合机制：汛期路基强度显著降低时，中等强度的行车荷载即可造成远超干燥状态下的结构响应，加速疲劳裂缝的萌生与扩展；冻融循环作用于高含水率路基土时，相变膨胀产生的冻胀力对面层形成周期性顶托，使裂缝开展速率在寒冷季节显著提升。材料劣化与结构失效之间存在正反馈机制，面层裂缝为水分入渗提供通道，加速基层软化，而基层承载能力下降又反过来加剧面层弯拉应力，形成损伤累积的自我强化回路。上述多因素非线性耦合特征决定了耐久性评价必须采用多维度综合分析框架，而非单指标阈值判断。

2 巡河道路结构耐久性评价体系构建

2.1 评价指标选取与层次结构设计

评价指标体系构建基于巡河道路结构劣化机理，遵循系统性、可量测性与敏感性原则并兼顾滨水环境特殊性，指标体系分为目标层、准则层与指标层三个层次。准则层设置路面结构状况、路基稳定性、排水系统功能与环境侵蚀强度四个维度。路面结构状况下设有路面损坏状况指数（PCI）、车辙深度、抗滑系数及渗水系数，路基稳定性下设有弯沉值、压实度及路基含水率，排水系统功能下设有边沟过水能力与排水设施完好率，环境侵蚀强度下设有年均浸水时长、干湿循环频次及氯离子浓度。各指标均具备现场检测或监测的可操作性，避免引入难以量化的定性描述，层次结构设计以路面损伤、路基稳定、排水功能与环境侵蚀四类劣化驱动逻辑为框架依据，确保评价结果能有效映射结构耐久性的真实衰退状态。

2.2 基于层次分析法的权重确定方法

权重确定运用层次分析法（AHP），此方法通过构造判断矩阵来量化各指标间相对重要程度。判断矩阵元素赋值依据路面结构损伤对行车安全与养护成本的影响程度，同时结合滨水环境下水文因素的主导性，由道路工程、水文地质及养护管理领域专家进行两两比较评分，标度采用 1～9 整数及其倒数。

对准则层判断矩阵计算最大特征值 $\lambda_{\max}$ ，一致性指标 CI 由下式确定：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

式（1）中： $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵最大特征值； n 为矩阵阶数。

进一步引入一致性比率 CR 对矩阵逻辑一致性进行检验：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式（2）中： RI 为同阶平均随机一致性指标，取值由标准表查得；要求 $CR < 0.10$ 方视为通过，否则需对判断矩阵进行修正。

通过一致性检验后，各指标权重向量由判断矩阵特征向量归一化得到：

$$W_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i} \quad (3)$$

式（3）中： $\bar{w}_i$ 为判断矩阵各行几何平均值； W_i 为第 i 个指标的最终权重。

在各准则层权重的计算结果里，路基稳定性和环境侵蚀强度的权重于准则层中相对较为突出，反映了滨水条件下水文环境对结构耐久性的主导性影响。指标层权重经过层次总排序之后，弯沉值、年均浸水时长以及 PCI 排在前三位，这与巡河道路实际病害的成因相吻合，权重分配具备合理的工程解释性。

2.3 耐久性等级划分与综合评判模型

耐久性等级综合参考《城镇道路养护技术规范》（CJJ 36-2016）里路面状况分级体系以及路面损坏状况指数（PCI）分级标准，同时结合巡河道路滨水环境的劣化特征，通过专家咨询来确定，把耐久性综合评分划分为优、良、中、差、劣五个等级，其对应评分区间分别为 [85, 100]、[70, 85)、[55, 70)、[40, 55) 以及 [0, 40)，并且各等级都有明确的结构状态描述与养护建议，方便管理决策直接应用。综合评判模型采用加权综合指数法，以各指标实测值经标准化处理后乘以对应权重并累加，得到耐久性综合评分 D ：

$$D = \sum_{i=1}^n W_i \cdot S_i \quad (4)$$

式（4）中： W_i 为第 i 个指标的权重； S_i 为第 i 个指标标准化后的得分； n 为指标总数。

指标标准化运用线性插值的方式，按照各指标性能阈值把实测值映射到 [0, 100] 区间，以此消除量纲之间的差异。针对路基含水率、渗水系数等具备临界效应的指标，引入分段函数来处理超限工况，防止线性模型在极端状态下出现评价失真的情况。综合评判模型输出的结果能够与地理信息系统相结合，生成路段耐久性的分布图，实现对巡河道路全线结构状况的空间可视化评价，从而为差异化养护决策提供定量的依据。

3 养护技术应用与全寿命周期管养策略

3.1 预防性养护技术及适用条件

预防性养护的核心要点在于干预时机的精准选择，也就是要在结构性能还未发生实质性衰退之前，实施

低成本的措施来延缓劣化的进程。适用于巡河道路的预防性养护技术主要涵盖雾封层、稀浆封层、裂缝灌缝以及微表处这四类，各类技术的适用条件与触发指标可见表1。雾封层是通过恢复沥青膜的完整性来阻断水分的渗入通道，稀浆封层能够有效封闭道路的细小

裂缝并恢复表面的抗滑性能，灌缝处理必须在缝内含水率低于临界值的时候进行施作，滨水路段适宜选用弹性聚氨酯或改性沥青灌缝材料，以此适应干湿循环所引起的缝宽周期变化，微表处适用于基层稳定但功能性出现衰退的路段。预防性养护的实施时机以耐久

表1 巡河道路预防性养护技术适用条件

养护技术	适用条件	触发指标	材料要求
雾封层	面层轻微氧化、集料轻度松散、结构完好	PCI ≥ 85，无明显变形	乳化沥青或稀释沥青
稀浆封层	路面轻微磨损、浅层裂缝	PCI 处于良级区间	改性乳化沥青混合料
裂缝灌缝	非结构性裂缝，缝内含水率低于临界值	缝宽 3 ~ 15 mm	弹性聚氨酯或改性沥青灌缝材料
微表处	基层稳定、路面功能性衰退	车辙深度 ≤ 12 mm	改性乳化沥青混合料

性综合评分处于良级区间下限（70 ~ 75 分）作为触发阈值，若过早介入会造成资源的浪费，若延误则会导致病害扩展加速，使得养护效费比显著下降。

3.2 功能性修复与结构性加固技术

功能性修复针对路面使用性能，已明显下降但路基结构尚具承载能力的路段，结构性加固则针对路基承载力不足或面层存在结构性损坏的路段，两类技术在适用条件与施工工艺上存在明显差异。功能性修复以铣刨重铺为主，铣刨深度依据弯沉检测结果与芯样分析确定，一般控制在 40 ~ 60 mm，重铺材料宜选用 SBS 改性沥青混合料以提升抗水损害性能；局部坑槽修补采用热再生或冷补料填充，修补范围须外扩至裂缝外缘 150 mm 以上，确保修补体与原路面的黏结强度。结构性加固针对路基软弱路段，可采用水泥搅拌桩或注浆加固提升路基承载力，弯沉值超过设计容许值时须进行基层补强；临水侧边坡防护宜采用生态混凝土护坡或格宾石笼，在满足防冲刷要求的同时兼顾透水性，避免封闭式防护因孔隙水压力积聚诱发坡面失稳。排水系统修复与路面结构加固应同步实施，以消除水患根源。

3.3 分级养护决策与智能化管养体系

分级养护决策以耐久性评价结果为输入，将养护措施与评价等级建立刚性对应关系：优、良级路段实施日常巡查与预防性养护，中级路段制定年度功能性修复计划，差级路段列入近期大中修计划，劣级路段立即启动结构性加固或重建并限制重型车辆通行。资源约束条件下，以病害扩展速率与养护效费比为目标函数，优先处置劣化快、影响范围广的关键路段^[5]。

智能化管养体系依托物联网传感器、无人机巡检与路面检测车实现结构状态动态感知：传感器布设于沉降敏感段，实时监测路基变形与含水率；无人机搭

载高清影像与红外热成像设备定期识别面层病害；检测数据接入管养平台后驱动耐久性评分动态更新，形成“检测—评价—决策—实施”闭环管养流程，支撑全生命周期精细化管理。

4 结束语

针对城市巡河道路滨水环境的特殊性，从病害机理、评价体系与养护技术三个层面开展系统研究。病害分析表明，水力、物理与化学三类劣化机制协同作用是结构耐久性衰退的根本原因；本文构建的多层次评价体系实现了耐久性状态的定量表征，五级评判模型可直接驱动分级养护决策；预防性养护、功能性修复与结构性加固技术的分类集成，配合智能化管养平台的闭环运行，有效提升了养护资源的配置效率。未来可结合长期监测数据对评价指标权重进行动态修正，并进一步验证时变耐久性模型在不同气候与水文条件下的适用性。

参考文献：

[1] 陈烈辉,章祯.城市滨江地区道路设计的特色和要点[J].上海建设科技,2023(06):57-59.

[2] 蒋武辉.道路桥梁结构耐久性设计问题研究[J].黑龙江交通科技,2022,45(08):97-99.

[3] 高程.城市道路改造中新旧路基搭接处理技术:以凉水河道路改造工程为例[J].工程技术研究,2022,07(06):58-60.

[4] 龙杰,肖静宇.道路轻骨料混凝土耐久性及微结构研究[J].黑龙江交通科技,2020,43(11):13-15.

[5] 胡照星.道路桥梁结构的耐久性设计与服役期性能监测技术[J].山西建筑,2025,51(17):140-143.