

基于技术状况的混凝土公路桥梁周期性预防性养护策略研究

李胜阳

丹东市交通运输事业发展中心 (丹东市港口航道事业发展中心)

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8846

[摘要] 本文以某地区国省干线公路桥梁为研究对象, 概括混凝土公路桥梁周期性预防性养护技术的基本原理以及病害评定方法, 通过非线性退化模型与交通模拟软件预测桥梁技术状况, 分析超载对结构性能的影响, 总结典型病害规律并制定周期性预防性养护方案。研究显示, 预防性养护可有效改善桥梁技术状态, 减缓结构劣化速度, 推迟桥梁技术等级从2类降至3类的时间, 相较传统事后养护模式, 在经济与社会效益上均具备显著优势。

[关键词] 技术状况; 混凝土公路桥梁; 周期性预防养护; 养护策略

Research on Periodic Preventive Maintenance Strategies for Concrete Highway Bridges Based on Technical Condition

Li Shengyang

Dandong Municipal Transportation Development Center (Dandong Port and Waterway Development Center)

[Abstract] This study focuses on highway bridges along national and provincial trunk routes in a specific region, outlining the fundamental principles of periodic preventive maintenance techniques for concrete highway bridges and disease assessment methods. By employing nonlinear degradation models and traffic simulation software to predict bridge technical conditions, the study analyzes the impact of overload on structural performance, identifies typical disease patterns, and formulates periodic preventive maintenance plans. The findings demonstrate that preventive maintenance effectively improves bridge technical conditions, slows structural deterioration, and delays the downgrade of bridge technical grades from Class 2 to Class 3. Compared to traditional post-failure maintenance approaches, this strategy offers significant economic and social benefits.

[Key words] Technical condition; Concrete highway bridges; Periodic preventive maintenance; Maintenance strategies

当前社会经济发展带动交通与货运需求不断攀升, 混凝土桥梁作为路网关键节点, 长期承受着繁重的交通荷载。在自然环境侵蚀与车辆反复作用下, 桥梁结构易出现裂缝、钢筋锈蚀、表层脱落等老化损伤问题, 直接威胁通行安全与结构稳定性^[1]。当前交通流量不断增大, 重载车辆比例持续上升, 加速了桥梁病害发展, 传统养护方式已难以满足精细化管控需求。预防性养护凭借早期检测、及时处置的优势, 能有效延缓结构劣化进程, 保障桥梁长期安全运营, 成为现代桥梁管理的重要技术手段。因此, 本文对基于技术状况的混凝土公路桥梁周期性预防

性养护策略进行研究, 具有重要意义。

1 混凝土公路桥梁周期性预防性养护技术的基本原理

1.1 结构性能衰减监测

结构性能衰减监测是桥梁预防性养护的核心基础, 以材料力学与结构力学为理论依据, 针对不同结构类型选取关键监测指标。混凝土结构监测应变、裂缝、碳化深度及钢筋锈蚀; 钢结构监测应力、焊缝与涂层厚度; 衬砌结构监测位移、渗水及平整度。通过实时采集数据, 与初始标准和历史数据对比, 绘

制性能衰减曲线，掌握退化规律，为制定养护措施、判断结构风险提供支撑。

1.2 病害早期识别和预警

病害早期识别和预警遵循“捕捉异常-数据分析-风险判定”流程，通过各类传感器对桥梁裂缝、钢筋锈蚀、漏水等病害进行量化监测。系统根据病害严重程度设置多级预警阈值，划分不同风险等级，达到关注值时加强跟踪观测；达到预警值时生成分析报告并建议专项检测；达到紧急值时立即推送高优先级预警并启动应急养护，可以有效控制结构风险，保障桥梁安全运营^[2]。

1.3 养护决策优化

养护决策优化以桥梁全生命周期成本与综合效益最优为目标，结合结构监测与病害预警数据，准确掌握桥梁技术状况和性能衰减趋势。同时结合结构特点与施工条件，评估各类养护工艺的适用性和可靠性，利用成本效益模型量化病害控制、寿命延长、运维节约等效益，并与养护投入进行对比。决策过程还充分考虑施工对环境和交通的影响，优先选择低扰动、短工期、绿色高效的养护方案，在保证桥梁安全耐久的前提下，实现技术可行、经济合理、社会影响小的综合最优决策，为周期性预防性养护提供科学依据。

2 混凝土公路桥梁病害评定方法

从实际来看，公路混凝土桥梁运营后易出现不同病害，如剥蚀、钢筋锈蚀、裂缝等，不及时养护，会持续削弱结构性能，影响桥梁承载力与耐久寿命，因此必须开展周期性养护工作^[3]。桥梁养护可以分为两类，一是纠正性养护，以大修、中修及加固改造为主；二是预防性养护，以小修和日常保养为主，主要针对不影响使用功能的轻度损伤。病害评定需依据公路桥梁评估标准，对全桥、整体结构及各类部件、构件、桥面系进行全面检测，明确病害类型与严重程度。评估过程中需考虑交通荷载折损，引入超载系数 $\gamma_{ex} = (\overline{P_{ex}}/P) \times (S_{ex}/S)$ ，其中 $\overline{P_{ex}}$ 、 P 、 S_{ex} 、 S 分别为超载均值、设计荷载、超载数量、交通总量，相关参数可通过实际交通量统计调查获取^[1]。

在构件评定中，结合超载系数构建评分公式， $W_{PMCL}(W_{BMCL}/W_{DMCL}) = 100 - (1 - \gamma_{ex}) \sum_{z=1}^k U_z$ ， W_{PMCL} 、 W_{BMCL} 、 W_{DMCL} 分别对上部结构、下部结构及桥面系构件进行打分，分值范围为 0~100，得分由构件评估扣分值决定。采用分层评估法，结合该公式进一步计算各部件及全桥总体得分，以此判定桥梁病害情况。评定过程中假定未涉及病害的构件及部件得分为 100 分，结合分层评估中的权重差异，明确预防性养护范围，主部件超标度低于 3、次部件超标度低于 2 的病害，均纳入预防性养护范畴，为后续养护方案的制定提供科学依据，保障桥梁结构安全稳定。

3 桥梁技术状况预测

3.1 构建退化模型

桥梁技术状况预测首先需要构建合理的退化模型，常见类

型包括线性与非线性两类，如直线型、指数型、三角函数型等。实际工程中，桥梁劣化受荷载、环境、材料等多重因素作用，退化过程呈现明显非线性特征，线性模型难以真实反映结构的实际衰减规律^[4]。同时，桥梁技术状况退化与可靠度、外观状态退化趋势相近，因此借鉴相关成熟模型，进行桥梁总体技术状况评价，结合结构性能演化特征，将桥梁退化过程划分为初始退化前平稳阶段与初始退化后劣化阶段，全面分析结构自身退化速率、车辆超载等外部荷载作用、自然环境侵蚀影响以及模型连续性要求，构建双参数非线性指数型退化模型，用于精准预测桥梁技术状况变化。通过多因素耦合计算，实现对桥梁技术状况变化趋势的精准模拟与量化预测，为后续养护决策提供可靠数据支撑。本文采用非线性退化模型进行桥梁技术状况的预测，模型如下。

$$D(t) = \begin{cases} D_0 & 0 \leq t \leq t_1 \\ D_0 [1 - \beta(e^{-(t-t_1)^\alpha} - 1)] & t > t_1 \end{cases}$$

$D(t)$ 、 α 、 β 、 t 、 t_1 分别为桥梁结构技术水平、退化指数、环境及外界荷载影响参数、时间函数、初始退化时间。

3.2 养护前后预防效果预测

为精准评估桥梁预防性养护的实施成效，需结合养护策略与退化模型，对养护前后的桥梁技术状况进行系统预测。桥梁养护策略多样，不同策略在养护效果、经济成本上存在明显差异，为确保预测的科学性与可比性，需统一设定预防养护间隔周期与养护效应持续时长，保证各项外部控制条件基本一致。在此前提下，假定单次养护后桥梁技术状况指标的增量相同，且养护后指标值均低于桥梁初始技术指标值，客观对比不同养护时机与实施方式的实际效果^[5]。养护实施后，桥梁技术状况退化呈现阶段性特征，在养护效应持续时间内，桥梁将按照统一的退化规律缓慢衰减；当超出养护效应持续时间后，桥梁退化速率将恢复至未养护状态下的初始退化水平，以此模拟养护对桥梁性能的保护作用及效应衰减过程。

结合桥梁初始退化时间、首次养护实施时间、养护间隔周期及养护效应持续时间的内在关联，构建四种具有明确时间约束的养护策略，可针对性适配不同交通荷载折损类型与特征的桥梁。四种策略具体如下：策略 1、2 在桥梁初始退化前不养护，前者间隔不超效应持续时间，后者则超过；策略 3、4 在初始退化前提前养护，前者间隔低于效应时长，后者超过。如图 1 所示。基于前文构建的退化模型，结合上述四种养护策略，可精准构建预测模型，计算任意时刻的桥梁技术状况，为养护效果评估与策略优化提供依据。

1	$t_1 \leq t_{p1}, t_p \leq t_{d0}$	技术状况无初始退化时，无养护；养护时间间隔小于养护效应持续时间
2	$t_1 \leq t_{p1}, t_p > t_{d0}$	技术状况无初始退化时，无养护；养护时间间隔大于养护效应持续时间
3	$t_{p1} + (m-1)t_p < t_1 \leq t_{p1} + (m-1)t_p, t_p \leq t_{d0}$	技术状况无初始退化时，已养护；养护时间间隔小于养护效应持续时间
4	$t_{p1} + (m-1)t_p < t_1 \leq t_{p1} + (m-1)t_p, t_p > t_{d0}$	技术状况无初始退化时，已养护；养护时间间隔大于养护效应持续时间

图 1 预防性养护策略

4 基于技术状况的混凝土公路桥梁周期性预防性养护策略优化

4.1 混凝土公路桥梁周期性预防性养护成本

混凝土公路桥梁周期性预防性养护的核心是优化养护时机, 养护间隔过晚无法发挥预防性作用, 过早则会造成资金浪费, 最优养护时机需以桥梁全生命周期养护费用最低为标准来确定。构建桥梁周期性预防性养护费用模型, 为养护时机与成本的优化提供量化支撑, 实现养护资源的合理配置。模型如下:

$$D(t_{p1}, t_p) = \sum_{i=1}^{n(t_{p1}, t_p)} C_i(t_{p1}, t_p) \frac{1}{(1+r)^{t_{p1}+i(n-1)t_p}}$$

$C(t_{p1}, t_p)$ 、 $C_i(t_{p1}, t_p)$ 、 $n(t_{p1}, t_p)$ 、 t_p 、 t_{p1} 分别为养护总费用、单次预防养护费用、养护次数、间隔时间、初始时间。确定养护方案后, 桥梁预防性养护成本由管理成本 (C_M)、用户成本 (C_U) 及社会成本 (C_S) 构成, 各类成本分别通过实际调查和交通仿真软件模拟确定。

4.2 混凝土公路桥梁周期性预防性养护初始时间与周期优化

借鉴相关研究成果, 采用单指标优化模型, 以寿命周期内最小养护成本为优化目标, 重点优化首次养护时间 t_{p1} 与养护间隔 t_p 。模型以养护总费用 $C(t_{p1}, t_p)$ 为目标函数, 以桥梁技术状况 $D(t) \geq 80$ 、养护最迟开始时间不小于 t_{p1} 、运营时间 t 不超过设计使用寿命 T 为约束条件, 确保桥梁长期维持 1 类、2 类高性能状态, 最大化延长服役时长。该优化模型可提升管养决策的客观性, 为养护方案制定提供科学依据。

4.3 实证分析

4.3.1 混凝土公路桥梁概况

本文选取某国道上的一座混凝土公路桥梁作为实证分析对象, 该桥始建于 20 世纪 70 年代, 目前已进入需重点关注的养护阶段。调研显示, 该桥桥面为沥青混凝土材质, 日均车流量 2.3 万辆, 其中货车 1.3 万辆, 货车超载现象突出, 超载率 72%, 平均超载 18%, 长期超载对桥梁结构造成一定损耗。现场检查发现, 桥梁整体技术状况良好, 但存在局部轻微病害, 包括梁体刮擦、铰缝勾缝脱落、桥台锈胀、伸缩缝破损、路面车辙及排水堵塞等, 虽然不影响正常通行, 但已具备开展预防性养护的条件, 为后续养护方案制定提供实践依据。评估过程中, 将交通荷载折损因素纳入桥梁技术状况评定体系, 依据前文设定的公式计算得出该桥梁的超载系数 γ_{ex} 为 0.073, 将该系数代入相关评分公式, 对桥梁进行分层分级打分评估。经综合评估测算, 该桥梁最终整体技术状况得分为 88.97 分, 依据相关规范评定为 2 类桥梁。检测结果同时表明, 桥梁主要受力构件存在的病害类型超过 3 类、次要构件病害类型超过 2 类, 完全满足预防性养护的实施条件, 为后续养护策略优化提供了真实有效的实证载体。

4.3.2 预防养护开始时间预测及防护总费用分析

该桥梁技术状况得分 88.97, 相当于未养护第 12 年的水平, 经计算确定最迟养护时间为现状起第五年, 如图 2 所示。养护直接成本为 8.5205 万元, 结合四种养护策略及既定参数 $r=3$ 、 $t_1=3$ 、 $t_{pb}=7$, 对首次养护时间与周期进行优化。结果显示, 策略 2 不满足最优要求, 策略 1 为最佳方案。2013 年当地交通

部门据此实施预防性加固改建, 在保障效果的同时节约了成本。实践表明, 该养护方式可有效提升桥梁技术状态, 显著减缓结构性性能劣化速率, 将桥梁在设计使用年限内从 2 类桥下降至 3 类桥的时间大幅推迟约 17 年, 延长了桥梁良好服役周期。

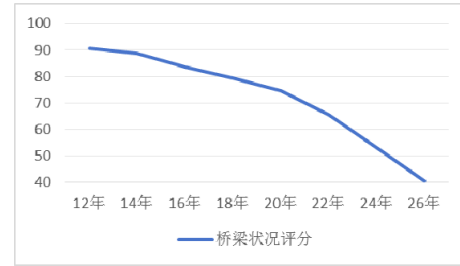


图2 桥梁状况评分图

5 结语

综上所述, 新时代背景下, 交通荷载持续增大, 混凝土公路桥梁的运行安全与长期稳定性受到广泛关注。预防性养护可通过早期干预延缓结构劣化, 有效延长桥梁安全使用寿命, 显著降低全生命周期综合养护成本, 对提升路网运营效益具有重要作用。本文以某地区国省干线公路桥梁为研究, 结合技术状况评估与非线性模型开展研究。结果表明, 1、2 类桥梁适宜实施预防性养护, 引入超载系数可更精准评定病害; 非线性退化模型能有效预测性能衰减并确定最佳养护时机。以全寿命周期费用最优优化养护策略, 能兼顾技术与经济效益。实施预防性养护能提升桥梁技术指标、减缓劣化速度, 推迟桥梁技术等级下降时间, 让桥梁在整个设计使用年限内长期保持稳定良好的服役状态, 保障通行安全与结构耐久。

参考文献

- [1]王凯.公路混凝土桥梁预防性养护应用[J].上海建设科技,2024,(01):88-91.
- [2]王再彬.预防性公路桥梁养护技术与运用分析[J].安家,2026(3):0025-0027.
- [3]孙永彪.混凝土桥梁预防性养护技术应用研究[J].工程技术研究,2024,9(24):63-65.
- [4]孙广俊,焦阳,吴炳延,等.基于技术状况的混凝土公路桥梁周期性预防性养护策略研究[J].南京工业大学学报(自然科学版),2022,44(01):82-91.
- [5]路方哲.公路混凝土桥梁的周期性预防养护研究[J].黑龙江交通科技,2023,46(2):85-87.

作者简介:李胜阳,1978年1月,男,辽宁省东港市,汉族,大学本科,高级工程师,丹东市交通运输事业发展中心(丹东市港口航道事业发展中心),研究方向:普通国省干线公路建设养护工程管理。