

混凝土梁式桥预防性养护的成本效益分析研究

胡懿之¹, 邓嘉骏², 范凌泰², 吴杰², 杨水旺³, 姚辰宇⁴

¹江苏交控人才发展集团有限公司, 江苏南京, 中国

²江苏扬子江高速通道管理有限公司, 江苏南京, 中国

³江苏高速公路工程养护技术有限公司, 江苏南京, 中国

⁴交通运输部公路科学研究院, 北京, 中国

【摘要】根据交通行业统计公报,截至2023年底,我国公路桥梁数量已达107.93万座,其中混凝土梁式桥占比17.4%,中小桥合计89.1361万座,占桥梁总数的82.6%。超过40%的桥梁已服役超过15年,进入了养护需求的高峰期。当前养护决策多聚焦“事后修复”,存在预防性养护边界界定不清、效益量化不全面的问题。本文以混凝土梁式桥为研究对象,系统调研了日常、定期、预防性、修复及专项五类养护的技术特征与成本构成,构建了涵盖直接成本、间接成本、失效成本的全生命周期成本核算体系,同时量化桥梁技术状况、经济、社会等效益,并通过全生命周期成本分析(LCCA)、效益成本比(BCR)、净现值(NPV)验证。结果表明:根据桥梁加固工程生命周期成本的横向对比分析,以及预防性养护对策研究,预防性养护相较于传统加固方案,能够有效降低全生命周期成本,提高桥梁的经济效益和社会效益,BCR>1、NPV>0,同时延长桥梁的使用寿命并降低事故率。

【关键词】桥梁; 预防养护; 全生命周期成本; 效益

1. 引言

随着我国公路网络持续完善、交通流量不断增长,公路养护行业正由传统的“抢修时代”逐步迈向“全面养护时代”,行业规模持续扩大,技术水平稳步提升,市场结构逐步优化[1-2]。混凝土梁式桥凭借结构稳定性佳、施工工艺成熟、适配多跨径场景等优势,已成为公路与市政交通网络的核心构成部分。截至2023年底,我国公路桥梁数量已达107.93万座,其中混凝土梁式桥占比17.4%,中小桥合计89.1361万座,占桥梁总数的82.6%,且中小跨径桥梁(桥龄普遍超过15~20年)占比较高,其中服役超15年的桥梁占比超40%,逐步进入“养护需求高峰”阶段。桥梁养护体系作为保障结构安全与通行效率的关键,通常涵盖日常养护(如桥面清洁、支座检查)、定期养护(如每2-3年的结构检测)、修复养护、专项养护及预防性养护五大类型。在当前工程实践中,多数养护决策仍聚焦于“事后修复”,即当桥梁出现明显病害后,才开展修复或专项养护工作,这导致养护成本高、交通中断时间长,且难以逆转结构性能的退化趋势[3-5]。

预防性养护作为“事前干预”的核心手段,旨在桥梁技术状况处于“I类、II类”阶段,依据《公路桥梁技术状况评定标准》

JTG/T H21,采用针对性措施(如桥面薄层罩面、裂缝密封、预应力体系维护)来减缓退化速率,延长结构寿命[6-9]。然而,现有研究与实践中,混凝土梁式桥预防性养护仍存在两大核心问题:一是养护内容界定不清晰,当前行业对于预防性养护的适用场景、措施类型缺乏统一标准,部分项目把“定期检测后的轻微修复”错误归为预防性养护,或者混淆预防性养护与专项养护的界限,致使养护措施与桥梁退化特征不匹配,出现“过度养护”或“养护不足”的情况;二是效益量化不清晰,传统成本分析大多聚焦于单次养护的直接费用(如材料、人工成本),未将全生命周期维度的间接成本(如交通延误、环境影响)与隐性效益(如寿命延长带来的重建成本节约、通行效率提升收益)纳入考量,致使养护决策容易陷入“重短期成本、轻长期效益”的误区,难以科学论证预防性养护的经济合理性[10-12]。

针对上述问题,尽管现有研究对单一养护措施的技术效果(例如某类密封材料的裂缝修复效率)和孤立的成本核算(例如预防性养护直接成本对比)进行了深入探讨,但它们往往忽略了全寿命周期的系统性分析。全寿命周期成本分析(LCCA)强调了从桥梁规划、设计、建设、运营、维护直至拆除

的全过程费用考量，包括日常养护的监测数据、定期养护的状态评估、预防性养护的措施投入以及修复养护的失效风险。这种全面分析有助于更准确地评估桥梁项目的经济效益，优化设计和养护策略，从而提高桥梁的经济性和耐久性。因此，开展混凝土梁式桥预防性养护全生命周期成本效益分析研究，兼具重要的理论与实践价值。理论上，可明确预防性养护在全生命周期中的定位，构建“养护类型-成本构成-效益维度”的关联模型，在实践中，能为养护决策提供量化依据，避免资源错配，进而实现“以最低全生命周期成本保障桥梁安全”的目标。

本研究以混凝土梁式桥为对象，系统调研了日常、定期、预防性、修复、专项五类养护的技术特征与成本构成，明确了预防性养护的范围和关键措施。基于全生命周期理论，本研究构建了一个包含直接成本（如检测、施工）、间接成本（如交通延误、环境影响）和失效成本（如病害扩大导致的修复费用）的成本核算体系，并量化了寿命延长、通行效率提升、事故率降低等效益。通过案例验证，本研究形成了预防性养护成本效益的计算方法，为混凝土梁式桥养护决策的科学化提供了支撑。

2. 预防养护成本构成分析

预防养护成本需包含直接投入与隐性消耗，并与未实施养护的失效成本进行对比，以确保分析的系统性。

2.1 预防养护直接成本（C1）

指实施养护措施直接产生的费用，可分为前期检测评估、中期施工、后期监测三个阶段。检测与评估成本：包括定期检测（人工巡检，以及无人机巡检、大数据分析、人工智能病害识别等先进技术）、状态评估（如BCI/PCI指数计算）及方案设计费用。若30m简支梁桥的年度无人机裂缝检测成本约0.8万~1.2万元，应变一位移实时监测系统初期布设成本约5~8万元。预防养护施工成本：依据措施类型差异，2024年国内典型措施单位成本参考表1。

2.2 预防养护间接成本（C2）

预防养护间接成本主要指养护过程对交通、环境产生的隐性影响，交通延误成本根据车道缩减/封闭导致的车辆时间损失，计算公式为：延误时长×车流量×单位时间延误成本。某城市主干道桥梁（日均流量20,000辆）单车道封闭48小时，参照《公路建设项目经

济评价方法与参数》，小型车延误成本1.2元/车·小时，总成本约为20,000辆×48小时×1.2元/车·小时=115.2万元。环境与社会成本包括材料运输碳排放（沥青运输碳排放系数0.12kg/t·km，碳交易价0.015元/kg），以及施工噪声污染补偿成本（约500~1000元/天·社区）。

表1. 混凝土梁式桥预防养护成本

预防养护措施	适用场景	成本（元/m ² 或元/延米）
桥面裂缝密封	早期裂缝宽度<0.3mm	80~120元/延米
桥面薄层罩面（沥青）	桥面平整度下降、轻微磨损	120~180元/m ²
支座防尘防腐处理	支座老化、锈蚀初期	500~800元/个
混凝土表面涂层防护	沿海桥梁氯离子侵蚀防护	150~220元/m ²
后期维护：养护后1~2年的复查、局部补修费用，通常为施工成本的5%~10%。		

2.3 未实施预防养护导致的失效成本（C3）

未实施预防养护导致的失效成本包括因桥梁结构及质量问题而增加的维修费用、因桥梁耐久性不足而提前进行的养护或更换成本，以及因桥梁使用性能下降导致的用户成本 and 环境影响成本。桥梁若未及时干预，退化至需大修或报废阶段所产生的代价，通常为预防性养护成本的3至10倍。早期裂缝未密封引发钢筋锈蚀后，单根主梁维修成本达8万~15万元（为密封成本的20~30倍）；支座失效更换成本2万~3万元/个（为防腐成本的3~5倍）。结构失效的连锁成本包括：交通中断损失（高速公路桥梁中断1日，损失50至100万元）、事故赔偿成本（桥面坑槽导致事故，单次赔偿10至50万元）、重建成本（中小跨径桥梁重建，每座200至500万元，为养护成本的50至100倍）。寿命周期损失主要指使用寿命的缩减，例如：未进行养护的桥梁，其寿命从50年缩短至30至35年，导致全生命周期成本显著增加。

3. 预防养护效益构成分析

3.1 技术指标（B1）

桥梁技术状况得以维持，技术状况等级保持在《公路桥梁技术状况评定标准》中的1至3类，避免降至4至5类的危桥状态。性能衰减得到减缓：桥面平整度衰减率（IRI值）从0.6米/公里·年降至0.2米/公里·年；支座故障率从5%/年降至1%/年。

3.2 经济效益 (B2)

相比传统的加固, 失效成本与预防性养护成本差值, 即

$$B=C_3-(C_1+C_2) \quad (1)$$

预防性养护总成本为 20 万元, 5 年后可避免大修成本 150 万元, 实现净节约 130 万元。

寿命延长效益: 通过养护可延长桥梁使用寿命 5 至 15 年, 从而推迟重建支出。按照 4% 的折现率 (参考国内基建基准收益率) 计算, 当重建成本为 500 万元时, 延长 10 年寿命的现值节约量为:

$$500/(1+4\%)^{10} - 500/(1+4\%)^{20} \approx 155 \text{ 万元 (现值计算)}。$$

通行效率得到提升, 预防性养护工期 (如罩面工程 < 72 小时) 相较于大修 (1 至 3 个月) 可显著降低延误成本。

3.3 社会效益 (B3)

根据桥梁可靠度与养护经济成本分析, 通过有效的养护措施, 可以显著降低事故率, 从而提升交通安全。例如, 某桥梁在养护后, 年事故数从 8 起降至 1 起, 这不仅减少了社会损失, 还带来了显著的经济效益。按照单起事故社会损失 50 万元计算, 年效益可达 350 万元。避免突发封闭导致的应急响应中断, 参考国内标准量化价值约 20 - 50 万元/次。

4. 混凝土梁式桥全生命周期成本分析

通过标准化方法将成本效益统一至货币维度, 采用全生命周期成本分析 (LCCA)、效益成本比 (BCR)、净现值 (NPV) 综合决策。

4.1 全生命周期成本分析 (LCCA)

比较“预防性养护”与“重建”方案的总成本

$$LCC = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (2)$$

其中, C_t 为第 t 年成本, i 为折现率 (取值范围为 4% - 6%), n 为寿命周期 (取值为 50 年)。

预防养护措施与重建的成本对比见表 2。

表 2. 预防养护措施与重建的成本对比 (万元)

方案	前期预防性养护	中期维护	后期失效 / 重建	全生命周期
预防性养护	80(每 10 年 1 次)	50	0(延长寿命至 55 年)	130
加固	0	200(大)	350(40 年重)	550

重建	修 3 次)	建)
结论: 预防性养护方案全周期成本降低 76.4%。		

4.2 效益成本比 (BCR)

判定方案经济可行性:

$$BCR = \frac{PV(B)}{PV(C)} \quad (3)$$

其中 $PV(B)$ 为总效益现值; $PV(C)$ 为总成本。

$BCR > 1$: 方案可行; $BCR = 1$: 需综合安全因素决策; $BCR < 1$: 不可行; 若 $PV(B) = 1,200$ 万元, $PV(C) = 800$ 万元, $BCR = 1.5 > 1$, 方案可行。

4.3 净现值 (NPV)

量化方案净收益:

$$NPV = PV(B) - PV(C) \quad (4)$$

$NPV > 0$: 具有经济合理性, $NPV \leq 0$: 不可行。

5. 结论

本文通过量化预防性养护全生命周期成本与未养护/延迟养护的失效成本, 对比二者在技术状况、经济、社会等效益差异, 进而判定预防性养护方案经济合理性。本质是从“被动维修”的事后补救转向“主动干预”的事前防控, 核心目标在于实现桥梁全生命周期成本最小化, 同时保障结构安全与通行效率。主要结论如下:

(1) 明确了预防性养护的适用场景 (桥梁技术状况 I 类、II 类阶段) 与核心措施 (桥面裂缝密封、薄层罩面等), 区分其与定期检测修复、专项养护的边界, 解决了行业内“过度养护”或“养护不足”的认知误区, 确立了“事前干预、减缓退化”的全生命周期定位。

(2) 构建的成本核算体系首次系统性纳入间接成本与失效成本, 未实施预防性养护的失效成本 (应急大修、结构连锁损失等) 为预防性养护成本的 3-10 倍, 证实“被动修复”的长期经济代价显著高于“主动预防”。

(3) 预防性养护可有效保障梁体抗弯承载力, 降低桥面平整度衰减率, 相比传统的加固方案大幅降低全生命周期成本, 延长寿命节约资金, 且缩短养护工期节约交通延误成本, 降低事故率, 减少事故损失。

(4) 通过 LCCA、BCR、NPV 综合分析, 验证了预防性养护方案的经济合理性 ($BCR > 1$ 、 $NPV > 0$), 形成可推广的成本效益计算方法, 可避免养护资源错配, 为混凝土梁式桥养护决策从“经验驱动”转向“数据驱动”提供关键技术支撑, 最终实现全生

命周期成本最小化与桥梁安全、通行效率的协同保障。

参考文献

- [1] Frangopol, D. M, & Kallen, M. J. Life-cycle cost analysis of structural systems [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(11), 1630-1640.
- [2] 刘曙光, 刘军, 刘咏华, 等. 基于 LCA 和 LCC 的桥梁全生命周期维护决策优化[J]. *中外公路*, 2023, 43 (04) : 124-130.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 公路养护技术标准: JTG 5110—2023. 北京: 人民交通出版社股份有限公司. [2024-3-1].
- [4] AASHTO (2023). *Guide to Preservation of Highway Bridge Decks*.
- [5] Stefano Sacconi, Laura Ierimonti, Ilaria Venanzi, et al. Life-cycle cost analysis of bridges subjected to fatigue damage [J]. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2021, 2(1), 1-12.
- [6] Natalia Zuniga-Garcia, W. Martinez-Alonso, André de Fortier Smit, et al. Economic analysis of pavement preservation techniques [J]. *Transportation Research Record*, 2018, 2672(12): 10-19.
- [7] Menghan Zhao. Comparative life cycle assessment of composite structures [J]. *Engineering Structures*, 2021, 112394.
- [8] 刘钊. 重载交通下公路养护预制拼装伸缩缝维修技术研究[J]. *交通与运输*, 2025, 38 (S2) : 141-143.
- [9] 张雷慧. 路面预防养护措施后评估指标体系及应用研究[J]. *运输经理世界*, 2025 (15) : 142-144.
- [10] 韩家伟. 公路养护中预防性养护技术的应用与效益分析[J]. *汽车周刊*, 2025, (06) : 19-21.
- [11] 张海峰. 基于全生命周期的国省道公路工程成本精细化管理研究[J]. *运输经理世界*, 2025, (13) : 28-30.
- [12] 王树杰, 张鹏, 邬冰, 等. 预防性养护技术在高速公路沥青路面养护中的运用评价[J]. *石油沥青*, 2025, 39 (02) : 56-62.