

# 市政道路桥梁韧性评估与碳中和目标耦合机制探析

李骥

新疆塔建三五九建工有限责任公司, 新疆阿拉尔市, 843300;

**摘要:** 在碳中和与韧性城市双重目标驱动下, 市政道路桥梁建设面临提升抗灾恢复能力与控制施工碳排放的协同挑战。针对二者耦合机理不清、决策依据不足的问题, 本研究构建了面向施工过程的韧性评估体系与碳排放核算方法, 系统分析了韧性提升与碳减排的互动关系。研究表明: 耐久性设计、预制装配技术可实现韧性提升与碳减排的协同; 而增加结构冗余度等传统韧性措施往往推高隐含碳排放, 需在全寿命视角下权衡短期增量与长期效益。基于此, 提出了韧性-碳排双目标优化的施工方案决策框架。研究结论可为市政工程建设统筹安全与低碳目标提供理论参考与实践指引。

**关键词:** 市政道路桥梁; 韧性评估; 碳排放; 施工过程; 耦合机制

**DOI:** 10.69979/3029-2727.26.04.009

## 1 引言

### 1.1 市政道路桥梁工程的发展现状与挑战

过去二十年, 中国城市道路里程与桥梁数量持续增长, 基本形成了覆盖主要城区的交通网络。然而, 大量建于21世纪初的基础设施目前已进入维修养护高峰期。据相关统计, 部分城市道路路面破损率上升, 一些桥梁出现结构性病害, 直接影响了通行效率与行车安全。

与此同时, 城市交通需求仍在刚性增长, 重载车辆比例增加, 极端天气事件频发, 给现有道路桥梁带来超负荷运行压力。早期建设标准偏低、养护资金投入不足等问题进一步加剧了设施的老化速度。如何在保障日常通行的前提下, 科学评估既有设施状态、优化维修加固策略, 已成为市政工程领域亟待解决的现实问题。

### 1.2 韧性城市理念的提出及其对基础设施的要求

面对城市风险复杂化趋势, 韧性理念逐渐替代传统抗灾思维。韧性不仅要求设施能够抵御冲击, 更强调受损后的快速恢复与适应能力。该理念已被纳入国家“十四五”规划, 成为基础设施建设的重要导向。

对市政道路桥梁而言, 韧性具体体现在: 结构上具备足够抗毁能力; 功能上能在受损后维持基本通行; 组织上确保应急资源可快速调配。这意味着工程建设需兼顾强度与可修复性, 并定期开展韧性评估。

### 1.3 碳中和目标下市政建设行业的转型压力

在“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”目标约束下, 市政建设行业面临迫切的绿色转型压力。道路桥梁工程从材料生产、运输到现场施工, 各环节均伴随大量碳排放。研究表明, 水泥和柴油是道路项目的主要排放源, 两者合计占比达56.6%, 其中水泥占36.7%、柴油

占19.9%。另一项对桥梁改造工程的测算显示, 材料生产阶段碳排放占比高达94.73%, 运输阶段占1.47%, 机械施工阶段占3.80%<sup>[1]</sup>。这意味着, 施工过程中的材料选用与工艺优化, 直接决定了工程的碳足迹水平。如何在牺牲结构性能的前提下降低碳排放, 已成为行业必须回应的现实命题。

### 1.4 研究目的、意义与技术路线

提升韧性与降低碳排放已成为市政道路桥梁建设的两大约束。然而, 两者并非孤立存在: 某些提升结构冗余的措施可能增加材料消耗与碳排放, 而延长使用寿命的耐久性设计则可能在全生命周期内实现碳减排。这种复杂的互动关系, 亟需系统揭示。

本研究旨在构建面向施工过程的韧性评估框架, 同步分析碳排放特征, 探明两者耦合机理。理论上, 将韧性城市与碳中和目标纳入统一分析框架, 为基础设施可持续发展提供新视角。实践中, 可为施工方案优化提供决策依据。研究按照“理论分析—体系构建—机制揭示—对策建议”的技术路线展开。

## 2 市政道路桥梁韧性评估体系构建

### 2.1 道路桥梁韧性的内涵界定与关键特征

道路桥梁韧性是指结构在遭受极端荷载或长期性能退化后, 能够维持基本功能并快速恢复至目标状态的能力。目前, 针对道路交通基础设施结构本体的韧性研究仍相对分散, 缺乏统一全面的定义和度量标准<sup>[2]</sup>。从抗震领域的研究进展看, 桥梁韧性已从传统的延性设计向可恢复功能结构方向发展, 其核心特征可归纳为四个方面: 一是鲁棒性, 即结构面对超设计荷载时具备足够的强度与稳定性; 二是冗余性, 指局部构件受损后结构仍能通过荷载重分布避免连续性倒塌; 三是可恢复性,

强调受损后可快速检测、加固并恢复通行功能；四是资源性，涉及应急资源的可调配能力。与传统可靠性关注概率失效不同，韧性更强调从冲击中“恢复”的动态过程。

## 2.2 面向施工期与运营期的韧性影响因素分析

道路桥梁韧性受多阶段因素共同影响，需分阶段识别关键变量。施工期方面，混凝土早期力学性能的变异性较大，其中早龄期强度对结构抗力的影响最为显著，是施工期风险控制的核心指标。此外，临时支撑体系的稳定性、施工工艺的可靠性以及人为操作误差，均可能对结构初始韧性水平产生直接影响。运营期方面，影响因素更为复杂：环境侵蚀（氯离子、硫酸盐等）加速材料性能劣化，交通荷载的往复作用引发疲劳损伤，服役时间增长导致抗力自然衰退。同时，养护管理策略的差异会显著改变性能退化速率。当前我国超120万座桥梁中，大量早期建成设施已进入病害高发期，年均改造需求逾万座，识别上述因素对韧性的影响机制，是开展科学评估的前提。

## 2.3 韧性评估指标体系设计与权重确定<sup>[3]</sup>

指标体系设计是韧性评估的基础工作，需遵循系统性、代表性与可操作性原则。目前常用的指标筛选框架包括压力-状态-响应模型，该模型从压力源、承灾状态和灾后响应三个属性出发，能够体现“原因-效应-响应”的逻辑关系，适用于地震灾害下桥梁韧性评价指标的遴选。指标确定后，需对各项指标赋予合理权重。权重确定方法可分为主观赋权法与客观赋权法两类：前者如层次分析法，依赖专家经验判断指标相对重要性；后者如熵权法，根据指标数据变异程度计算权重。为兼顾主观经验与客观信息，可采用博弈论将两类方法进行组合赋权，有效提升权重分配的科学性。

## 2.4 基于多源数据的韧性评估方法研究

传统韧性评估多依赖单一来源的结构检测数据，难以全面反映设施的真实状态。多源数据的引入为提升评估精度提供了新途径。从数据类型看，可融合结构健康监测数据、历史病害记录、交通荷载数据、遥感影像以及社会经济统计数据等。从评估方法看，当前研究呈现从静态评估向动态评估发展的趋势：一类方法采用数据智能驱动模型，如结合BERTopic主题建模与社会网络分析识别关键韧性特征，或利用模糊贝叶斯网络量化特征间的作用关系；另一类方法则通过GIS空间分析技术实现韧性水平的可视化表达与空间分异规律挖掘。多源数据的融合应用，能够有效克服单一数据源的局限性，实现从“点状检测”向“面域评估”的拓展，为韧性提升靶

点的精准识别提供数据支撑。

## 3 市政道路桥梁施工碳中和实现路径

### 3.1 道路桥梁施工全过程碳排放源项识别

道路桥梁施工期的碳排放源项识别是开展碳核算的基础工作。根据现有研究，可将建设期碳排放边界划分为材料生产、材料运输、场外加工、现场施工四个阶段，采用碳排放因子法对各阶段排放量进行核算<sup>[4]</sup>。材料生产阶段主要排放源包括水泥、钢材、混凝土等建材在生产过程中产生的碳排放；材料运输阶段涉及各类建材从产地至工地的运输过程，排放强度取决于运输距离与运载工具类型；场外加工阶段包括预制构件生产过程中的能源消耗；现场施工阶段则涵盖施工机械运行、现场照明、办公生活等直接与间接能源消费。研究表明，混凝土桥建设期碳排放约95%来源于水泥、钢材、回旋钻机和交流电弧焊机，识别关键排放源是制定有效减排措施的前提<sup>[4]</sup>。

### 3.2 施工期碳排放核算方法与模型构建

施工期碳排放核算的核心在于方法选择与模型构建。目前主流方法为排放系数法，其基本原理是活动数据与碳排放因子的乘积，前者包括施工机械台班用量、燃油消耗量、电力消耗量等，后者则反映单位活动的碳排放强度。核算边界的界定直接影响计算结果，通常需明确纳入材料消耗、机械运转、能源消耗等碳源类别。从模型构建看，当前研究正从宏观估算向精细化方向发展：一类是基于施工定额的核算模型，通过提取工程量清单中的机械台班数据实现过程级核算；另一类则融合BIM技术，实现施工过程活动数据的自动提取与动态核算。模型构建需兼顾数据可获取性与核算精度，为后续减排策略制定提供量化基础。

### 3.3 低碳施工关键技术与管理措施分析

低碳施工技术主要围绕材料替代、工艺优化与能源结构展开。材料层面，超高性能混凝土可降低碳排放约35%，再生骨料替代天然石料减少矿山开采量30%以上。工艺层面，装配化施工相比现浇方式减少现场扬尘30%、噪声40%，装配式便道实现板材重复使用。能源层面，电动设备与太阳能照明已在部分工程应用，宜昌某项目通过节能改造实现碳减排268.96吨。

管理措施方面，需建立覆盖施工全周期的低碳管控体系。通过BIM技术优化施工流程，可精准控制材料用量。宜昌项目应用绿色施工管理制度，节约钢筋43.4吨、混凝土72.6吨，施工用水节约21.56%、用电节约12.2%。琼海项目构建“四节一环保”技术体系，应用透水混凝土降低地表径流25%，实施扬尘在线监测与三

色预警机制,实现动态监管。

## 4 韧性提升与碳减排的耦合作用机理

### 4.1 韧性设计与低碳策略的协同效应分析

韧性设计与低碳策略并非彼此割裂,在多个层面存在协同关系。耐久性提升是二者协同的典型领域:采用高性能混凝土或增加保护层厚度,既能延缓氯离子侵蚀导致的钢筋锈蚀、增强结构长期韧性,又能延长服役寿命、减少大修重建带来的全生命周期碳排放。全生命周期视角下,初期适当增加投入以提高结构耐久性,往往比后期频繁维修更具低碳韧性综合效益。

结构选型层面亦有协同空间:预制装配技术既因构件工厂化生产而提升质量一致性、增强结构冗余度,又因减少现场湿作业而降低施工期碳排放。此外,低碳材料如地聚物混凝土、再生骨料的开发应用,若配合合理的结构构造设计,可在满足韧性要求的同时显著降低碳足迹。上述协同效应的发挥,需在方案设计阶段统筹考虑韧性与碳排双目标。

### 4.2 韧性提升措施对碳排放的间接影响

韧性提升措施对碳排放的影响具有双重效应,需辩证看待。一方面,增强结构冗余度往往意味着增加材料用量:如增设抗震支座、加大构件截面尺寸或增加配筋率,这些措施在提升结构抗毁能力的同时,直接导致钢材、混凝土消耗量上升,进而推高隐含碳排放。研究显示,为满足高韧性要求,部分桥梁构件的钢纤维掺量增加30%以上,材料生产阶段碳排放相应增加。

另一方面,韧性提升可产生长期的碳减排效益。采用高性能材料的结构具有更好的抗劣化性能,可延长大修周期、减少中期维修次数。健康监测系统的部署虽增加少量设备能耗,但能够实现精准养护、避免过度维修,从而在全生命周期尺度上降低总碳排放量。因此,评估韧性措施的碳影响需建立全寿命视角,平衡短期增量与长期效益。

### 4.3 低碳目标约束下韧性建设的优化路径

在低碳目标约束下,韧性建设需从单一追求“越高越好”转向“适度韧性、最小碳耗”的优化思路。首先,应建立韧性等级与碳排放强度的关联模型,明确不同韧性水平对应的碳成本,以此确定合理韧性目标区间。其次,结构选型上优先采用高性能材料与预制装配技术,实现同等韧性指标下的碳耗最小化。再次,设计阶段引入BIM技术进行多方案比选,量化比选韧性与碳排放的权衡关系。最后,运维阶段依托健康监测数据实施精准维护,避免过度干预。通过上述路径,可在满足韧性

要求的前提下实现碳排放的有效控制,达成韧性与低碳的双重目标。

### 4.4 基于耦合机理的施工方案决策框架

基于韧性提升与碳排放的耦合机理,可构建面向施工方案的多目标决策框架。该框架以韧性指数与碳排强度为核心评价指标,将二者纳入统一的量化体系。决策流程分为三步:首先,针对待选施工方案分别计算韧性评估值与碳排放量;其次,绘制韧性-碳排二维散点图,识别帕累托前沿解集;最后,结合工程预算、工期约束与韧性目标要求,在解集中择优确定实施方案。该框架实现了从单一目标优化向韧性与低碳双重约束下的综合决策转变,为施工组织设计提供量化支撑。

## 5 结论与展望

本研究构建了面向施工过程的市政道路桥梁韧性评估体系与碳排放核算方法,揭示了韧性提升与碳减排之间的耦合机理,主要创新在于将韧性城市与碳中和目标纳入统一分析框架,明确了二者的协同效应(耐久性设计、预制装配技术)与权衡关系(冗余度增加带来碳成本)。对建设管理的启示是:应建立全寿命视角,在方案决策阶段引入韧性-碳排双目标优化,避免片面追求单一指标。研究局限性在于数据获取受限、指标体系动态性不足、案例验证尚不充分,未来需进一步开展多类型工程实证,完善动态评估模型,探索智能化决策工具。

### 参考文献

- [1] Li X, Xiao J Z, Zhu L Y, et al. Assessing carbon emissions of the innovative renovation project of Yihe Bridge on Beijing Road[J]. *Low-carbon Materials and Green Construction*, 2025, 3(1): 9.
- [2] 黄晓明, 赵润民. 道路交通基础设施韧性研究现状及展望[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(6): 1529-1542.
- [3] 郝伟, 王德凯, 刘坤杰, 等. 基于PSR模型与贝叶斯网络的钢-混组合梁桥抗震韧性评价[J]. *公路交通科技*, 2025, 42(10): 281-290.
- [4] 王元庆, 田蓉, 李士明, 等. 考虑多解释变量共线性的混凝土桥建设期碳排放测算方法[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*. 2025, 47(06): 214-223.

作者简介: 李骥, 女, 汉族, 学历: 大专, 籍贯: 湖南, 论文研究方向(具体): 市政道路(桥梁)。