

路桥隧工程中新技术与新材料应用的挑战与集成优化路径研究

陶麒麟

中交(青岛)城市建设有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i7.18241

[摘要] 面对复杂建设环境,新技术与新材料是提升路桥隧工程质效的关键。本文剖析了技术集成度低、材料与工艺协同差、标准滞后等核心挑战,进而提出以数字孪生驱动流程再造、性能化材料工艺设计、全生命周期成本建模及动态标准体系为核心的集成优化路径。研究表明,推动技术、材料、管理与标准深度融合,是突破发展瓶颈、实现智能建造的必然选择。

[关键词] 路桥隧工程; 智能化施工; 高性能材料; 全生命周期成本
中图分类号: TP212.6 **文献标识码:** A

Research on Challenges and Integrated Optimization Pathways for the Application of New Technologies and Materials in Road, Bridge, and Tunnel Engineering

Qilin Tao

China Communications Construction (Qingdao) Urban Construction Co., Ltd.

[Abstract] In response to complex construction environments, new technologies and materials are crucial for improving the quality and efficiency of road, bridge, and tunnel engineering. This paper analyzes core challenges such as low technology integration, poor material-process synergy, and lagging standards. It further proposes an integrated optimization pathway centered on digital twin-driven workflow reengineering, performance-based material-process design, life-cycle cost modeling, and dynamic standard systems. The study shows that deep integration of technology, materials, management, and standards is essential to overcoming current bottlenecks and advancing toward intelligent construction.

[Key words] Road, Bridge, and Tunnel Engineering; Intelligent Construction; High-Performance Materials; Life-Cycle Cost

前言

我国交通基础设施正向超大跨径、超长隧道和复杂环境适应方向快速发展,对路桥隧工程的质量、效率与耐久性提出了更高要求。以BIM、智能传感和高性能复合材料为代表的新技术、新材料,正成为推动行业转型的核心动力。与欧美相比,我国在超级工程应用规模上占优,但在数字孪生与BIM融合、智能运维标准建设等方面起步更早,集成化与标准化程度更高。目前,我国实践中仍存在“技术孤岛”、材料与工艺脱节、标准更新滞后等问题,制约了技术效能的充分发挥。因此,梳理关键难点、探索集成优化路径,对提升我国路桥隧工程建设水平具有重要意义。

1 路桥隧工程中新技术与材料应用难点

1.1 技术集成与施工适应性不足

在路桥隧工程中,BIM建模、数字孪生、智能监测、设备自动化、信息化管理等方面的应用日益广泛^[1]。现有技术手段虽能实现施工模拟、过程优化及实时监测,但由于系统复杂、施工

现场条件多变,其自适应能力面临较大挑战。智能设备与监测系统在数据接口、工作流程、运行环境等方面存在差异,若缺乏统一规范的接口,容易形成“信息孤岛”,降低施工效率。此外,施工人员对新技术的掌握程度不一,缺乏系统培训会进一步限制其技术发挥,影响施工流程的数字化推进,从而对工程进度与安全造成不利影响^[2]。

1.2 材料性能与施工工艺匹配问题

高性能混凝土、纤维增强材料、自密实混凝土、特种沥青、FRP复合材料等已成为路桥隧工程中的主流材料。然而,此类材料对施工工艺较为敏感,受施工环境及外部条件影响显著。例如,自密实混凝土的施工需严格控制温度、振动、运输等条件,养护不当易导致结构早期损坏或质量下降;复合材料作为增强体时,若工艺参数与材料特性不匹配,易引发界面结合不良、应力集中或耐久性降低。材料特性与施工技术之间的不匹配问题,已成为制约工程质量与耐久性的重要因素^[3]。

1.3 规范标准与监管体系不完善

在新技术、新材料快速发展的背景下,行业面临标准更新滞后的问题。我国在高性能材料选用、智能监测系统的设计、施工和验收等方面尚未形成统一标准,导致施工企业面临选择困难与依据不足的困境。尤其在大型桥梁、隧道工程中,缺乏对智能设备运行状态及数据可靠性的有效评估方法,影响工程质量和运营安全。此外,不同地区、企业在标准执行中存在差异,限制了新技术与新材料的推广应用效果^[4]。

2 路桥隧工程中新技术与新材料应用的集成优化路径

2.1 案例概况

某跨江大桥为主跨185m的预应力混凝土连续梁桥,桥面全宽34.5m,设计荷载为公路-I级。该桥主梁采用单箱双室变截面箱形结构,墩顶处梁高11.5m,跨中梁高3.2m。施工采用挂篮悬臂浇筑工艺,全桥共划分126个节段,标准节段长度4m,最大节段混凝土方量达198m³。工程所在地地质条件复杂,需应对季节性水位变化及航运干扰,对施工线形控制与结构应力状态提出了严格要求。

2.2 构建数字孪生驱动的协同管理平台

对于所述大跨径连续梁桥而言,其悬臂施工过程中的结构状态控制直接关系到成桥线形与内力分布的合理性。传统施工控制方法主要依赖定期测量与经验调整,存在响应滞后性。数字孪生平台通过集成BIM设计模型、实时传感器网络(如应力、位移、温度监测)及环境数据,能够构建一个与物理桥梁同步演化的虚拟模型,从而实现对施工过程的精准预测与主动控制。在此平台中,基于理论模型与实际监测数据的对比分析至关重要,其中,预测下一节段立模标高是控制成桥线形的核心环节。其计算需综合考虑多类因素的影响,可采用以下考虑混凝土收缩徐变、温度效应及结构体系转换的立模标高预测公式进行说明:

$$H_i^{set} = H_i^{the} + \sum_{j=1}^{i-1} f_j^{creep} + \sum_{j=1}^{i-1} f_j^{shrink} + f_i^{temp} + \delta_{i-1}^{meas} \quad (1)$$

公式(1)中, H_i^{set} 为第*i*节段的立模标高设定值; H_i^{the} 第*i*节段的设计理论标高; $\sum_{j=1}^{i-1} f_j^{creep}$ 为已浇筑节段混凝土徐变效应引起的累计挠度修正值; $\sum_{j=1}^{i-1} f_j^{shrink}$ 为已浇筑节段混凝土收缩效应引起的累计挠度修正值; f_i^{temp} 为当前环境温度场相对于基准温度引起的标高变化修正值; δ_{i-1}^{meas} 为前一节段浇筑后实测标高与预测标高的偏差值,用于反馈调整。该公式的应用体现了数字孪生平台的预测-反馈控制逻辑。平台基于材料本构模型、环境历史数据预测收缩徐变效应 f_j^{creep} 和 f_j^{shrink} ,利用温

度传感器数据计算温度效应 f_i^{temp} ,并引入最新实测偏差

δ_{i-1}^{meas} 对模型进行实时修正,从而计算出更为精准的立模标高 H_i^{set} 。以该桥第12号节段($i=12$)的立模标高计算为例,假定设计理论标高 H_{12}^{the} 为+54.326m。通过平台模型计算,前11个节段

因混凝土徐变引起的累计修正值 $\sum_{j=1}^{11} f_j^{creep}$ 为-28.5mm,收缩引

起的累计修正值 $\sum_{j=1}^{11} f_j^{shrink}$ 为-15.2mm。实时温度监测显示当前

前梁体温度场相对于20℃基准温度导致梁体伸长,修正值

f_{12}^{temp} 取+5.8mm。同时,第11号节段浇筑后,实测标高与上一循

环预测值存在-3.1mm的偏差,即 $\delta_{11}^{meas} = -3.1$ mm。代入公式(1)计算:

$$H_{12}^{set} = 54.326 + (-0.0285) + (-0.0152) + 0.0058 + (-0.0031)$$

$$H_{12}^{set} = 54.326 - 0.041 = 54.285\text{m}$$

据此,第12号节段的立模标高应设定为54.285m。下表1展示了该桥5个典型节段的立模标高计算关键参数与结果。计算结果表明,随着悬臂长度的增加,混凝土收缩徐变引起的累计下挠修正量(负值)持续增大,是影响立模标高的最主要因素。温度修正值随环境变化而波动,实测偏差的引入则有效修正了模型预测误差。

表1 基于数字孪生平台的不同节段立模标高预测与修正分析

节段编号	理论标高 (m)	徐变累计修正 (mm)	收缩累计修正 (mm)	温度修正 (mm)	实测偏差 (mm)	立模标高设定值 (m)
8	52.118	-16.8	-9.1	4.2	-2.5	52.094
10	53.222	-22.3	-12.3	6.1	-2.8	53.191
12	54.326	-28.5	-15.2	5.8	-3.1	54.285
14	55.43	-35.1	-18.6	4.5	-2.9	55.378
16	56.534	-42	-22.5	3.1	-3.3	56.469

2.3 材料选型与施工工艺匹配

在桥隧工程中,新材料的选用与工艺的精准匹配,直接关系到结构的服役性能与使用寿命。高性能混凝土、纤维增强混凝土、自密实混凝土、特种沥青及FRP复合材料等在桥梁、隧道、高速工程中广泛应用,其实际性能高度依赖施工工艺的控制水平。若材料与工艺不匹配,易导致结构耐久性下降、开裂等早期病害。因此,必须建立材料与工艺协同设计的系统方法。

材料选型不应仅依据理论性能,更应重点考察其在具体工程环境与工艺条件下的适用性。建议引入材料-工艺匹配性评估流程:在初选阶段,通过室内试验、模拟养护及模型试验等手段,系统测试材料在项目实际温湿度、热环境及拟采用工艺下的工作性能与长期性能。例如,选用特种沥青时,需评估其在摊铺温度、压实条件及本地集料特性下的实际路用性能;应用FRP材料时,则应深入分析其在施工粘贴、张拉过程中及长期服役下的界

面粘结性能、蠕变特性及其与基材的协同工作机制。表2提供了一种针对常见新材料的工艺匹配性关键评估要点示例。

表2 路桥隧工程常见新材料与施工工艺匹配性评估要点

材料类别	关键性能指标	匹配施工工艺要点	常见不匹配风险
自密实混凝土	填充性、间隙通过性、抗离析性	浇筑速度、模板密封性、免振捣工艺、养护制度(温湿度)	浇筑不密实、表面缺陷、强度不均匀
纤维增强混凝土	纤维分散均匀性、韧性、抗裂性	搅拌工艺与时长、浇筑与振捣方式、表面收光工艺	纤维结团、力学性能不达标、表面观感差
FRP复合材料	粘结强度、抗拉强度、耐久性	基层处理、胶粘剂配制与涂抹、张拉控制、固化环境	界面剥离、应力集中、长期性能退化
特种改性沥青	高温稳定性、低温抗裂性、耐疲劳性	拌和与施工温度、摊铺与压实工艺、接缝处理	车辙、温缩裂缝、早期水损害

2.4 规范标准与质量监管

完善的规范与质量监测体系是保障路桥隧工程质量、安全与耐久性的关键。以港珠澳大桥为例,该项目在设计、施工、运营阶段全面推行标准化管理与智能监测,形成了一套可供借鉴的系统经验。工程针对高性能混凝土、FRP复合材料及特种沥青等材料,制定了统一的性能指标、施工参数与验收标准,实现对材料性能的全过程追溯。借助光纤应变、位移、加速度及温度等传感器,对主梁、吊索、岛隧连接段、沉管隧道等关键结构进行实时监测,并结合实测数据验证理论模型的准确性。

在特大跨桥梁施工中,对吊装、浇筑、支架安装等工艺实施精细化控制,严格管理施工精度与材料配比,落实质量责任制,确保各环节符合规范要求。同时,组织施工团队开展新材料应用、智能设备操作与数据管理培训,并进行操作考评。项目以“标准化体系、数字化监控、智能运营”为核心,构建覆盖全生命周期的安全监测体系,为我国推动高质量、高精度的公路桥梁建设

提供了重要范例。

可见,在现代化路桥建设中,规范标准的制定、责任体系的落实与智能监测体系的构建,必须实现系统协同,共同支撑工程品质的提升^[5]。

3 结语

综上所述,本文研究表明,新技术与新材料的融合是提升路桥隧工程品质与效能的关键。未来,人工智能与机器学习将推动结构监测与运维向“主动预警”转型;数字孪生可实现全生命周期数据动态映射,支持精细化决策;在“双碳”目标下,材料选择更注重全生命周期碳排放,推动低碳、再生及高性能复合材料的创新应用,共同促进路桥隧工程向智能化、绿色化、可持续发展。

[参考文献]

- [1]祁宁.现代隧道施工中注浆技术的应用与发展研究[J].科技与创新,2025,(20):110-112.
- [2]刘成.智能监测技术在路桥隧工程施工质量控制中的应用[J].四川水泥,2025,(11):267-269.
- [3]付旺.道路桥梁隧道工程施工中的难点和技术对策[J].建材发展导向,2024,22(22):90-92.
- [4]陈彦军.超深淤泥质下穿隧道再生材料围堰关键技术研究应用[J].粘接,2021,46(05):173-176.
- [5]刘玉明,卢文龙,徐熙震.基于模数一体化的路桥隧智能建造业务要素分级分类方法研究[J].中国铁路,2025,(08):1-8.

作者简介:

陶麒麟(1992--),男,汉族,辽宁锦州人,本科,工程师,从事公路工程研究。