《环境敏感区桥梁智慧低碳施工与检测技术研究》项目社会经济效益综合分析

董方晓

溧阳市交通运输综合行政执法大队，中国·江苏 常州 213399

摘要：环境敏感区桥梁智慧低碳施工与检测技术是近年来基于溧阳地区公路桥梁智能施工实践所开展的一项重要科研课题，旨在解决施工过程中环境污染严重、资源利用效率低、结构耐久性不足及质量检测精度不高等突出问题。本研究围绕施工对环境的负面影响与环境反作用于工程质量的双向机制，系统研发并集成应用了包括智能协同装配线平衡技术、多活性有机纳米固钙法混凝土致密性提升技术、后张法预应力孔道压浆密实度检测技术在内的多项关键技术。研究成果在多个重点工程中成功应用，取得了显著的社会、经济与生态效益，具有广泛的推广应用价值。

关键词：敏感区；施工；低碳；检测；效益

Comprehensive Analysis of Social and Economic Benefits of the Project "Research on Intelligent and Low-Carbon Construction and Detection Technology for Bridges in Environmentally Sensitive Areas"

Dong Fangxiao

Liyang Municipal Comprehensive Administrative Law Enforcement Brigade for Transportation, China Jiangsu Changzhou 213399

Abstract: The intelligent low-carbon construction and inspection technology for bridges in environmentally sensitive areas is a significant research project developed in recent years based on the intelligent construction practices of highway bridges in Liyang. It aims to address prominent issues such as severe environmental pollution during construction, low resource utilization efficiency, insufficient structural durability, and low accuracy in quality inspection. This study focuses on the bidirectional mechanism of negative environmental impacts from construction and the counteraction of the environment on engineering quality. It systematically develops and integrates multiple key technologies, including intelligent collaborative assembly line balancing techniques, multi-active organic nano-calcium solidification concrete densification technology, and post-tensioning prestressed duct grouting compactness detection technology. The research findings have been successfully applied in several key projects, achieving remarkable social, economic, and ecological benefits, with broad potential for widespread adoption.

Keywords: Sensitive areas; Construction; Low-carbon; Detection; Benefits

0 引言

随着我国交通基础设施建设的快速发展，公路桥梁工程不断向生态敏感区域延伸。在生态保护要求日益严格的背景下，传统粗放式施工模式已难以满足绿色可持续发展的需求。特别是在自然保护区、水源地、湿地及长江生态带等环境敏感区，施工活动对空气、水体、土壤和生物多样性的影响备受关注。与此同时，国家“双碳”战略目标的提出，进一步推动了交通建设领域向低碳化、智能化转型。在此背景下，发展适用于环境敏感区的桥梁智慧低碳施工与检测技术，成为实现工程质量提升与生态环境保护协同推进的关键路径。本文以溧阳地区典型项目为依托，系统研究并应用成套智慧低碳施工技术，探索其在环境保护、质量控制、安全管理与经济效益等方面的综合效益，为同类工程提供可复制、可推广的技术范式和管理经验。

1 项目研究内容

1.1 桥梁施工对环境造成的负面影响以及环境条件对施工质量的反向作用

当施工处于环境敏感区时，施工将会引起空气质量降

低、水质受到污染、土壤遭到破坏、噪声惊扰居民及动物等。本研究将针对环境敏感区使用智慧化手段以降低施工对环境的负面影响；研究环境敏感区施工降碳的问题；研究环境敏感区提升混凝土强度、降低混凝土拌制标准差的方法；研究环境敏感区桥梁构件碳化问题及解决方法；研究成熟度法混凝土强度推定方法，以及冬期施工混凝土质量评价方法。

1.2 敏感环境条件下桥梁智慧低碳施工技术及应用

研究全智能流水线小型构件施工；研究智能协同数控装配线进行桥梁预制施工方法；研究智能压滤固化方法进行泥浆再利用和工艺评价方法；研究长江保护区节段梁智能匹配施工工艺；研发智能养生机器人以提升结构物构件养生效率。

1.3 敏感环境下结构质量控制措施及质量检测方法

研究桥梁结构物质量通病及防治方法，采用六西格玛质量管理技术进行质量管理工作；研究钢筋保护层厚度的检测方法；研究预应力张拉孔道压浆密实度检测方法；研究锚下预应力复现技术。

2 项目关键技术创新

本研究关键技术涉及环境敏感区桥梁智慧低碳施工技术装备成套应用、质量控制与检测技术等。

2.1 智慧化成套设备智能协同装配线平衡技术应用[1]

根据环境敏感区桥梁施工特点及环境对工程质量的反向作用，采用智慧化成套设备智能协同装配线平衡技术进行桥梁施工组织管理。该技术涵盖桥梁预制构件集中预制、全智能预制施工设备的组合应用、全智能预制施工设备在装配线上的协同技术、装配线平衡技术等在桥梁预制施工中的应用技术，并采用了六西格玛标准进行桥梁预制施工评价。

经研究团队评价，敏感环境区域内噪声级减少了42%；环境敏感区施工污水处理达标率达到了100%，固废利用率达到99.2%，施工引起的PM2.5平均浓度降低了93.6%；临时用地节约了32.2%；施工质量综合西格玛水平达到4.6，过程能力综合指数为1.37。

2.2 多活性有机纳米固钙法混凝土致密性提升技术[2]

使用绿色环保材料——固钙水剂改善混凝土外部结构特性，使用高频共振水泥颗粒分散法制作高致密性混凝土以提高混凝土强度和耐久性。

固钙水剂是利用多活性有机纳米材料与铂催化剂加成反应生成的表面活性水剂材料，这种材料喷涂到混凝土表面，能抑制混凝土表面微裂缝继续发展，并通过混凝土表面微孔隙和微裂缝浸入至混凝土内部，将混凝土中的氢氧化钙成分固化，使之免受碳酸气体侵蚀，在混凝土一定深度内形成致密层，从而提高混凝土表面强度和致密性。该材料在混凝土强度早期使用，可使混凝土硬化过程中的微裂缝产生自愈合效果，该材料在混凝土达到一定强度后使用，可有效地封闭表面裂缝和微孔隙。

2.3 后张法预应力孔道压浆密实度检测技术[3]

使用冲击弹性波、微创定量施测方法对预应力孔道压浆密实度进行检测。首先使用冲击弹性波孔道压浆检测仪对有怀疑的预应力孔道进行缺陷定位检测，之后再使用孔道压浆微创定量检测仪对孔道压浆密实情况进行定量检测。以此方法检测的孔道，缺陷检出率提高了32%，定量检测精度达 ±10mm。

3 效益分析

3.1 社会效益分析

环境敏感区桥梁智慧低碳施工技术的应用，在环境保护、安全文明施工、企业管理、促进科技进步、技术人才培养等方面都有积极的作用。

3.1.1 环境保护方面

本技术能够较大程度地减少因施工对环境产生的破坏。施工所采用的降尘措施，改善了施工现场附近的空气环境；采用的降噪措施，降低了施工噪音对附近居民的影响；采用集中装配线施工，有效的利用预制场地，节约了临时用地数量，尽可能地降低临时用地对生态的破坏；使用泥浆固化设备处治弃浆，分离了固化物和水，并对水进行无污染处理，减少了施工对当地水环境的影响，同时，固化物再利用减少了泥浆弃浆占用的土地和对环境的污染，同时再利用固化物造田对生态起到积极的作用。

使用本成套技术施工，碳排放量显著降低，达到了低碳施工的效果，科研参与单位和其他应用单位在三年内共降碳25492.8t。碳排放量计算详见表1和表2。

3.1.2 安全文明施工方面

在运用智慧化施工过程中，做到了施工现场全方位的监管，能让施工技术人员意识到安装智慧工地系统的意义，从而促使其形成较好的安全意识。在监管时，采用BIM技术进行安全施工模拟，并对施工现场流程进行工作单元划分，从而通过模拟模型了解施工现场人员工作情况，与此同时也可以掌握机械设备运用的情况等，高度符合安全施工的要求。

使用泥浆固化技术降低了泥浆弃浆场地造成的安全隐患；使用智能控制设备进行桥梁预制施工，减少了施工工

表1 环境敏感区桥梁智慧低碳施工技术降碳数量表（科研参与单位）

序号	技术名称	碳排放减少数量（t）			
		2020年	2021年	2022年	合计
1	泥浆智能压滤固化技术	29.2	35.5	25.1	89.8
2	集中预制梁智能装配线平衡技术	913.3	1,640.0	1103.3	3656.7
3	小型预制构件智能流水线施工技术	410.0	1073.3	1186.7	2670.0
4	高频振动水泥颗粒分散法混凝土拌合技术应用	526.7	626.7	553.3	1706.7
5	混凝土成熟度理论及智慧化养生技术	101.7	206.7	143.3	451.7
6	混凝土强浸封闭技术及其他专利技术	0.2	0.2	0.2	0.6
7	长江保护区节段梁智能匹配调节技术	19.0	21.7	16.0	56.7
8	3D桥面铺装技术	14.0	20.2	19.5	53.7
9	总计（t）	2014.0	3624.2	3047.5	8685.7

表2 环境敏感区桥梁智慧低碳施工技术降碳数量表（其他单位）

序号	技术名称	碳排放减少数量（t）			
		2020年	2021年	2022年	合计
1	泥浆智能压滤固化技术	45.4	32.9	34.2	112.5
2	集中预制梁智能装配线平衡技术	1366.9	1839.2	1697.7	4903.8
3	小型预制构件智能流水线施工技术	700.0	632.4	737.9	2070.3
4	高频振动水泥颗粒分散法混凝土拌合技术应用	1480.7	1739.6	1407.6	4627.8
5	混凝土成熟度理论及智慧化养生技术	1225.9	2339.0	1527.4	5092.3
6	其他智慧化技术	0.0	0.1	0.3	0.4
7	总计（t）	4818.9	6583.2	5405.0	16807.1

人的用量，降低了人为操作设备的安全风险；智慧化施工管理还能对人员行为进行安全风险识别和预警，保证了施工安全。

3.1.3 施工质量管理方面

使用桥梁施工智慧化举措，在企业施工质量管理方面具有积极意义。智慧化施工促进了工程信息化管理进程，实现了数据共享和实时查询、监控，促进了施工流程的规范化管理，减少管理上的人为控制与漏洞，保证了工程质量，促进了决策的科学化，保证了决策的准确性。

在质量管理方面，使用该技术提高了工程质量，工程项目合格率显著提高，同时提高了工程单位的社会影响力。

3.1.4 促进科技进步和技术人才培养方面

智慧低碳施工涉及到管理工程技术、信息化工程、物联网工程、通讯技术、网络技术、机械及其自动化技术、环境工程技术、安全技术、建筑工程技术、公路与桥梁施工技术、试验检测技术、现代管理技术、大数据等诸多技术。工程技术人员和施工工人通过这些技术的应用，具备了先进施工能力，同时也改变了社会上对公路施工的传统刻板印象，对培养高素质技术人才具有重大的意义。

3.2 经济效益分析

环境敏感区桥梁工程智慧低碳施工成套技术的应用，对降低施工成本，创造经济价值起到了积极作用。

3.2.1 泥浆智能压滤固化技术

泥浆智能压滤固化设备的应用，在减少污染同时，还节省了大量的施工成本，如省去了泥浆堆放的用地征用费、固化物再利用可节省外购土费用，部分施工单位还将此工艺用于河塘清淤，并且把淤泥固化后用于造田，创造了价值。

3.2.2 集中预制梁智能装配线平衡技术

本技术的应用产生的效益主要为节省临时用地、装配线利用效率提高节省了工期和机械台班费、施工质量提升减少了劣质质量成本。

3.2.3 小型预制构件智能流水线施工技术

本技术应用产生的效益主要有节省分散预制施工带来的临时用地费用增加、减少劣质质量成本。

3.2.4 智能高频振动水泥颗粒分散法混凝土拌和技术

本技术应用主要目的是提升混凝土拌和的均匀性，使水泥颗粒充分与水相融合，以提高混凝土强度，并同时起到节省水泥的作用。

在2020-2022三年的研究应用期内，本技术所带来的经济效益分为科研参与单位产生的经济效益和其他应用单位产生的经济效益。经研究团队测算，共产生经济效益价

表3 环境敏感区桥梁智慧化低碳施工技术经济效益表（科研参与单位）

序号	技术名称	经济效益（万元）			合计（万元）
		2020	2021	2022	
1	泥浆智能压滤固化技术	80.0	100.3	164.9	345.2
2	集中预制梁智能装配线平衡技术	99.9	134.4	169.5	403.9
3	小型预制构件智能流水线施工技术	66.8	75.2	119.4	261.3
4	高频振动混凝土颗粒分散法混凝土拌和技术应用	26.7	39.6	47.2	113.5
5	混凝土智慧化养生技术	7.3	8.3	11.0	26.7
6	其他智慧化技术	9.3	10.2	14.8	34.3
7	混凝土强浸封闭技术及其他专利技术	36.7	42.1	47.2	126.0
8	无损检测技术	70.1	75.2	87.1	232.3
9	智慧化管理平台	74.1	79.8	96.2	250.1
10	长江保护区节段梁智能匹配调节技术	21.0	27.0	29.7	77.7
11	桥面3D铺装技术	30.4	33.5	38.5	102.4
12	总计（万元）	522.4	625.6	825.4	1973.4

表4 环境敏感区桥梁智慧化低碳施工技术经济效益表（其他应用单位）

序号	技术名称	效益（万元）			合计（万元）
		2020	2021	2022	
1	泥浆智能压滤固化技术	171.4	123.3	126.4	421.1
2	集中预制梁智能装配线平衡技术	137.0	192.6	212.3	542.0
3	小型预制构件智能流水线施工技术	53.3	61.7	72.7	187.7
4	高频振动混凝土颗粒分散法混凝土拌和技术应用	126.7	98.7	126.4	351.8
5	混凝土智慧化养生技术	97.4	120.1	106.7	324.2
6	其他智慧化技术	8.5	8.5	7.0	24.0
7	无损检测技术	116.9	165.5	199.0	481.4
8	智慧化管理平台	21.2	25.9	38.0	85.0
9	总计（万元）	732.4	796.3	888.5	2417.3

值4390.7万元。具体效益额情况详见表3和表4。

4 结语

本研究项目成套技术成果已经成功应用于盐洛高速公路、连宿高速公路、平广高速公路扩建、常泰长江大桥、溧高高速公路、溧宁高速公路、S341等国家和江苏省重点交通建设工程，涉及到生态旅游区、沿海环境保护区、长江生态保护区等敏感环境区域，为高速公路桥梁途经环境敏感区施工组织、环境保护、质量控制等工作提供了科学的指导，保证了公路工程施工能够顺利、高效、环保、安全地推进，取得了显著的经济效益和社会效益。成套技术成果在上述重点交通建设工程的实际应用具有典型示范作用，有推广应用价值。同时，相关技术成果取得的专利、软件著作权、论文、团体标准等，为今后环境敏感区的桥梁施工提供了理论和技术支撑，将助力我国桥梁智慧化、绿色化施工的科技进步。

参考文献：

[1] 李志强，王伟. 智慧工地在桥梁预制施工中的应用进展[J]. 中国市政工程, 2022(3): 88-92.

[2] Zhang, Y., Liu, H., Chen, G. (2021). Low-carbon development strategies for transportation infrastructure construction under the carbon neutrality target. Journal of Cleaner Production, 315, 128234. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128234.

[3] 中华人民共和国交通运输部.《绿色交通“十四五”发展规划》[Z]. 北京：交通运输部，2021.