

Research on Construction Monitoring and Key Technologies of Extradosed Bridge with Corrugated Steel Webs in Complex Environment

Baoshi Xie

China Railway Shanghai Engineering Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300450, China

Abstract

This study conducted systematic research on precision construction techniques for the Tianjin Rail Transit Line Z4 Overpass Bridge project spanning the Beijing-Tianjin Expressway. Addressing technical challenges including small-radius curves ($R=600\text{m}$), steep longitudinal gradients (25%), construction safety during span crossing, and alignment control for steel-concrete composite structures, the research employed innovative methods such as BIM spatial positioning technology, channel steel reverse-clamping dual-limiting processes, phased dynamic control models, and comprehensive bottom protection systems. These approaches achieved precise control targets including cable saddle installation errors $\leq 1\text{mm}$, 99.6% verticality compliance rate for hanging basket tracks, and bridge elevation deviations $\leq \pm 8\text{mm}$, ensuring zero safety incidents during expressway crossing construction. The findings demonstrate that this technical framework effectively overcomes critical construction bottlenecks for low-tower cable-stayed bridges with corrugated steel webs in complex environments, providing essential technical support for similar bridge projects with significant engineering application value and promotion potential.

Keywords

Short tower cable-stayed bridge; Corrugated steel web; Construction monitoring; Cable force control; Alignment control

复杂环境下波形钢腹板矮塔斜拉桥施工监控与关键技术研究

谢宝石

中铁上海工程局集团第四工程有限公司, 中国·天津 300450

摘要

本文针对天津轨道交通 Z4 线跨京津高速波形钢腹板矮塔斜拉桥工程中面临的小半径曲线 ($R=600\text{m}$)、大纵坡 (25%)、跨线施工安全及钢-混组合结构线形控制等技术难题, 开展了系统性的精细化施工技术研究。通过采用 BIM 空间解析定位技术、槽钢反扣双重限位工艺、分阶段动态调控模型及全兜底防护体系等创新方法, 成功实现了索鞍安装误差 $\leq 1\text{mm}$ 、挂篮轨道垂直度合格率 99.6%、成桥标高偏差 $\leq \pm 8\text{mm}$ 的精准控制目标, 确保了跨高速施工期间的安全事故为零。研究成果表明, 该技术体系有效突破了复杂环境条件下波形钢腹板矮塔斜拉桥施工的关键技术瓶颈, 为同类桥梁工程的建设提供了重要技术支持, 具有显著的工程应用价值和推广意义。

关键词

矮塔斜拉桥; 波形钢腹板; 施工监控; 索力控制; 线形控制

1 引言

1.1 研究背景

随着我国城市轨道交通与高速公路网络的快速发展, 桥梁工程建设面临跨越既有交通干线、适应复杂地形线形等多重技术挑战。矮塔斜拉桥以其跨越能力强、造型美观、经济性强等优势, 在交通工程中得到广泛应用^[1]。矮塔斜拉桥作为介于连续梁与斜拉桥之间的桥型, 具有结构刚度大、造

型美观、经济性好等特点^[2]。波形钢腹板与矮塔斜拉桥的结合, 充分发挥了二者的技术优势, 特别适用于中等跨径、对结构景观和自重控制要求较高的工程项目。然而, 该组合体系构造复杂, 施工过程中涉及挂篮悬臂浇筑、波形钢腹板单元吊装与定位、斜拉索分级张拉等多道工序, 且伴随多次结构体系转换, 其几何非线性行为显著, 结构内力与线形状态变化敏感, 施工控制难度较大。特别是在跨越交通流量极高的既有高速公路时, 高空作业风险与毫米级线形控制精度要求对施工安全防护与精准测量提出了极限挑战。本研究旨在解决高速铁路矮塔斜拉桥施工过程中的技术难题, 提升施工

【作者简介】谢宝石 (1988—), 男, 中国辽宁凌源人, 本科, 工程师, 从事建设工程研究。

控制水平, 为同类桥梁建设积累经验^[3]。

1.2 工程概况

天津轨道交通 Z4 线一期工程土建施工第 4 合同段包含两座跨越京津高速及集疏港公路的波形钢腹板矮塔斜拉桥。左线桥跨布置为 (76+140+124+62.5)m, 右线为 (82+148+70+35)m。该桥地处交通要道, 具有以下显著特点: ①线形复杂: 桥梁位于最小平曲线半径 $R=600\text{m}$ 的弯道及竖曲线变坡点上; ②跨度大: 右线主跨达 148m, 为同类型桥梁中的较大跨度; ③环境苛刻: 主跨直接跨越交通流量巨大的京津高速公路; ④结构新颖: 主梁采用单箱单室波形钢腹板组合箱梁, 腹板采用 1600 型 Q345qE 钢板, 板厚 24mm。

1.3 研究内容

本文以该项目为工程背景, 聚焦复杂环境下的施工安全与质量控制关键技术, 重点研究: ①小半径弯桥条件下波形钢腹板的精准安装定位技术与钢-混结合段的可靠性施工工艺, 特别是栓钉连接的抗剪性能控制; ②跨越高速公路况下全封闭防护挂篮系统的设计与安全实施策略; ③基于“无应力状态法”与“最小二乘法”的施工监控体系及斜拉索分级张拉优化策略。

2 桥梁结构特点与施工难点

2.1 结构设计特征

本桥主梁采用单箱单室断面, 以波形钢腹板替代传统混凝土腹板, 该设计具有三方面显著优势: 其一, 大幅减轻结构自重, 波形钢腹板自重仅为同等厚度混凝土腹板的 1/3~1/4, 有效降低了下部结构的工程规模; 其二, 显著改善结构受力性能, 波折形态赋予腹板极高的面外刚度和抗剪屈服能力, 同时减小了对箱梁顶底板纵向预应力效应的约束, 形成“体外预应力”效应, 成为该结构的核心优势; 其三, 显著提高施工效率, 工厂化制作的波形钢腹板作为标准化安装单元, 避免了现场大量腹板钢筋绑扎和复杂模板支护作业, 缩短了工期。主塔采用钢筋混凝土结构, 梁面以上塔高 23m; 斜拉索采用环氧喷涂钢绞线, 按双索面布置, 塔端锚固采用分丝管式索鞍结构, 该布置方式有利于索力均匀分布及结构耐久性保障。

2.2 施工重难点分析

基于结构特点及现场环境, 本项目施工面临三大核心技术难题: ①异形线形控制难题: 桥梁位于平曲线和竖曲线上, 每个节段的波形钢腹板在三维空间中的安装姿态各不相同, 传统测量定位方法效率低、误差大; ②钢-混结合段施工可靠性难题: 波形钢腹板与混凝土顶、底板的连接是传力关键节点, 如何确保大量栓钉的焊接质量、混凝土浇筑时埋入段的抗拔移精准定位以及防止结合部漏浆, 直接关系到结构的耐久性和承载能力; ③跨线施工安全风险管控难题: 在日均车流量数万辆的高速公路上空作业, 任何微小构件或水滴的坠落都可能引发重大交通事故。

3 关键施工技术研究

3.1 波形钢腹板安装与定位技术

3.1.1 差异化吊装运输工艺

根据桥下环境特点, 采用差异化的吊装方案: 非跨高速公路区段采用塔吊直接吊装工艺; 跨越高速公路区段采用“塔吊+桥面运输+挂篮辅助吊装”工艺, 先将钢腹板吊至桥面, 利用轨道平板车水平运输至挂篮下方, 再通过挂篮主桁横梁组合电动葫芦进行垂直起吊安装, 完全规避了在高速公路上空进行垂直吊装作业的风险。

3.1.2 “刚性骨架定位法”精准定位工艺

为解决空间异形线形下的定位难题, 创新采用“刚性骨架定位法”: ①骨架构成: 利用 I20 工字钢作为主纵梁, I12 槽钢作为横向连接系, 焊接形成独立的高刚度空间桁架支撑系统; ②微调系统: 在骨架上设置三维微调机构, 通过底部千斤顶精确控制腹板标高, 通过双向可调节拉杆和撑杆控制平面位置和垂直度。该工艺将波形钢腹板定位精度控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内。

3.1.3 连接关键技术与质量控制

纵向连接采用双面搭接贴角焊, 严格遵循《钢结构焊接规范》(GB 50661) 的相关要求所有焊缝进行 100% 超声波探伤, 一级焊缝进行 20%X 射线探伤抽检。钢-混结合部采用 ML15 焊钉连接顶板, 焊钉的布置间距与焊接质量直接决定了结合段的抗剪承载力, 采用埋入式连接底板, 关键控制点是在混凝土浇筑前用遇水膨胀止浆条严密塞填腹板与钢筋之间的缝隙, 彻底杜绝漏浆现象。

3.2 挂篮悬臂浇筑与安全防护技术

3.2.1 全封闭防护系统设计

针对跨高速施工, 设计了多层级的综合防护体系: ①刚性密封层: 挂篮底部平台满铺 5mm 防滑钢板, 所有接缝连续焊接或打密封胶; ②柔性防护层: 在钢板层下方悬挂阻燃型安全密目网 (≥ 2000 目); ③防火隔离层: 在防护网内侧全覆盖阻燃防火毯 (耐火极限 $\geq 2\text{h}$); ④防滴漏系统: 在挂篮周边设置集水槽和导流管, 将有组织排水引导至桥墩处排水系统。

3.2.2 挂篮行走锚固技术创新

采用“槽钢横向半开孔固定法”解决挂篮轨道预埋垂直度问题: ①预先将 I10 槽钢沿腹板一分为二切割; ②在槽钢腹板上按设计间距钻孔; ③将精轧螺纹钢穿过孔洞, 用反扣的另一半槽钢扣合焊接。此法使挂篮轨道预埋垂直度合格率达到 99.6%。

3.3 斜拉索施工与索力控制技术

3.3.1 单根挂索与等张力法

采用单根钢绞线挂索法, 其优势在于单根钢绞线重量轻, 张拉设备小, 特别适合空间受限的桥塔作业。以首根安装传感器的钢绞线为基准, 控制后续钢绞线的张拉油压, 确保同索内各钢绞线受力一致。

3.3.2 索力与线形双控监控策略

拉索的张拉力直接影响主梁的内力分布与成桥线形,

在部分斜拉桥中,索力状态是反映全桥内力状态的关键指标[4]。借助专用设备对施工阶段与成桥阶段的索力进行精确测定,是施工监控系统的核心任务之一[5]。基于“线形与索力双控”原则,项目通过二次张拉与成桥整体调索实现精准控制,并结合实时现场监测确保施工阶段索力与设计值高度吻合。项目建立了“预测→实测→对比→调整→反馈”的闭环监控体系,具体包括:①采用有限元软件建立施工全过程仿真模型;②现场同步采集每一工况下主梁标高、斜拉索索力及控制截面应力数据;③实时对比实测值与理论值,动态调整下一节段的预抬量;④依据现场实测参数反演修正计算模型。通过上述精细化控制,主梁合龙标高误差控制在 $\pm 20\text{ mm}$ 以内,成桥索力误差小于2%

4 施工监控与质量控制体系

4.1 系统化的监控内容与方法

斜拉桥的施工控制是一个包含预告、施工、测量、识别、修正、再预告的闭环动态控制过程。要求控制系统除了具备常规的结构分析计算功能外,还应具备在施工现场根据实测参数自主识别并消除设计与实际状态不一致性的自适应能力,并能及时提供准确的标高和索力修正值[6]。在监控实施方面:几何监控采用全站仪、精密水准仪和GPS定位系统,严格控制标高偏差 $\leq \pm 20\text{ mm}$,轴线偏差 $\leq \pm 10\text{ mm}$;应力监控通过内置式混凝土应变计和钢筋计实时监测,设定预警阈值为设计值的80%;索力监控采用频谱分析仪和锚索计,确保索力偏差控制在 $\leq \pm 2\%$ 以内;温度监控则采用热电偶和温度传感器,用于确定最佳立模时间。

4.2 全过程质量控制措施

在原材料方面,采用定点供应机制,即选定同一家搅拌站、同一品牌与标号的水泥,以及同一产地的骨料,从源头上确保混凝土配合比与水胶比的一致性与稳定性。合龙段施工严格遵循温度控制原则,选择在夜间低温且气温趋于稳定的时段进行,采用“刚性支撑+主动顶推+配重平衡”的集成控制方案,以主动约束合龙口变形,抵消因昼夜温差引起的结构变形,确保合龙段线形与内力符合设计要求。

4.3 基于风险管理的安全监控

挂篮悬臂施工过程中涉及工作工序多,各种不同类型的风险影响因素大,因此有必要针对各种不同类型的施工阶段和施工工艺流程进行深入分析研判,并提出有针对性的处理措施。为此,项目建立了动态安全风险监控体系[8]:在风险辨识阶段,组织施工、监理及业主各方开展联合安全交底,系统识别潜在风险源并制定预控措施清单;实时监测阶段,于挂篮底部关键位置布设高清摄像装置,对高速公路通行状况及挂篮底部封闭状态进行全天候不间断监控;应急响应阶段,编制专项应急预案并定期组织演练,确保路企联动机制可及时、高效启动。

4.4 数据管理与信息化应用

搭建施工监控信息化平台,实现数据自动采集、无线传输、集中管理与智能分析。平台具备数据集成、趋势预警和数字档案功能,可自动绘制应力、线形随时间变化的曲线,当数据异常时自动向相关负责人报警,实现从“事后处理”

到“事前预控”的转变。

5 实施效果与成果分析

5.1 质量与精度控制成果

通过成套技术的综合应用,取得了卓越的实施效果:线形控制方面,主梁底板标高与设计理论标高的最大偏差为 $+8\text{ mm}$,最小偏差为 -5 mm ;索力控制方面,成桥索力实测值与设计值的最大偏差为 -1.7% ,分布均匀;应力状态方面,施工全过程及成桥后,主梁控制截面混凝土压应力和波形钢腹板剪应力均处于安全范围内。

5.2 安全与进度成效

安全方面,在整个跨越京津高速的近一年施工期内,未发生任何因施工引起的交通安全事故或长时间交通中断事件,安全事故率为零;进度方面,标准节段(6.4m)的施工周期稳定控制在10-12天,确保了整体工期目标的实现。

5.3 经济效益与社会效益

经济效益方面,波形钢腹板的应用减轻了上部结构重量约25%,相应降低了下部结构的造价,全桥造价与同等跨径的常规混凝土桥基本持平;社会效益方面,项目的成功极大减少了因施工对京津高速的干扰,保障了区域经济的正常运行,为后续城市复杂环境下桥梁建设积累了宝贵经验。

6 结语

通过对天津轨道交通Z4线跨京津高速波形钢腹板矮塔斜拉桥工程的实践总结,形成了以下核心成果:一是采用方案规定的劲性骨架定位与三维坐标精调技术,实现了索鞍安装关键尺寸实测最大偏差不大于 1 mm 的精度控制;二是创新应用槽钢横向半开孔固定法,使挂篮轨道预埋件垂直度验收合格率达到99.6%;三是配合监控单位实施基于“线形与索力双控”的监控策略,通过实测数据反馈使主梁合龙标高误差控制在 $\pm 20\text{ mm}$ 以内、成桥索力误差小于2%;四是严格执行方案设计的全封闭防护系统,结合动态风险监控,确保了跨高速施工零安全事故。本技术体系有效解决了复杂环境下同类桥梁的施工瓶颈,相关实践经验可为类似工程提供参考。

参考文献

- [1] 吴正安(导师:刘来君).高赞大桥施工控制技术[D].长安大学,2010-05-05.
- [2] 白絮(导师:郝宪武).基于无应力状态法的无背索斜拉桥施工控制[D].长安大学硕士论文,2012-04-25.
- [3] 刘伟汉(导师:刘平).钢腹板多室超宽箱梁矮塔斜拉桥施工过程关键技术研究[D].河北工业大学硕士论文,2022-03-01.
- [4] 王宏志.城际铁路大跨度连续梁桥上跨高速公路挂篮悬臂施工安全控制技术[J].工程与建设,2023-04-15.
- [5] 王荣超.高速铁路矮塔斜拉桥施工过程力学性能研究[J].价值工程,2026-02-25.
- [6] 郭维强,Bruno BRISEGHIELLA,陈权,薛俊青,Camillo NUTI.边跨非对称悬臂施工对矮塔斜拉桥合理施工状态影响研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2025-01-28.