

基于有限元-BIM技术的双层钢箱梁施工技术研究

邓婕

(广东省公路建设有限公司江罗分公司, 广东 云浮 527300)

摘要: 研究双层临时支架设计及吊装施工技术。以一座(62+80+70+50)m双层变截面钢箱梁为例, 设计了适用于该桥施工的双层临时支架。采用MIDAS Civil建立该支架的三维仿真有限元模型; 用CDN协同分析软件对临时支架、钢箱梁的强度、稳定性进行分析验算。基于BIM技术, 采用Revit软件精细化建模模拟、优化支架架设、箱梁吊装施工全过程, 确定原施工方案的空间碰撞点, 优化了箱梁吊装顺序。结果表明, 本项目设计的临时支架符合规范要求, 可用于双层箱梁施工。本文提出的基于有限元模型和BIM技术的双层梁施工技术是可行的, 可推广应用于同类桥梁的施工方案设计。

关键词: 双层梁; 有限元模型; BIM技术; 施工技术研究

中图分类号: U445.4

文献标识码: A

Research on the Construction Technology of Double-Layer Steel Box Girder Bridge Based on Finite Element-BIM Technology

DENG Jie

(Jiangluo Branch of Guangdong Province Highway Construction Co., Ltd., Yunfu 527300, Guangdong, China)

Abstract: This study focuses on the design and hoisting construction technology of double-layer temporary supports. Taking a (62+80+70+50)m double-layer steel box girder with variable cross-sections as an example, a double-layer temporary support suitable for the construction of this bridgewas designed. MIDAS Civil was adopted to establish a 3D simulated finite element model of the support, and CDN collaborative analysis software was employed to analyze and verify the strength and stability of the temporary support and steel box girder. Based on BIM technology, Revit software was utilized for refined modeling to simulate and optimize the entire process of support erection and box girder hoisting. The spatial collision points in the original construction scheme were identified, and the hoisting sequence of the box girder was optimized. The results show that the temporary support designed for this project meets the specification requirements and is applicable to the construction of double-layer box girders. The double-layer beam construction technology proposed in this pape, which is based on finite element modeling and BIM technology is feasible and can be popularized and applied to the construction plan design of similar bridges.

Key words: double-layer steelbox girder bridge; finite element model; BIM technology; research on construction technology

1 引言

钢箱梁易于拼装, 施工效率高, 平顺性、稳定性好, 近年来广泛用于公路和铁路桥梁。但钢箱梁对施工精度要求高, 且施工吊装机械对于工

作空间也有较高要求。针对上述问题国内外学者的研究进展概述如下。

第一, 对于施工空间受限问题, 分为上部空间受限、下部空间受限。对于上部空间受限的桥梁吊装施工问题^[1-2], 朱晓明等^[3]采用菱形桥面

收稿日期: 2025-08-13

作者简介: 邓婕, 硕士, 研究方向为桥梁结构计算与分析, 高速公路施工、养护技术研究

吊机吊装钢箱梁,吊机尾端横撑采用可开合式结构,保证了斜拉索在中间安装的操作空间和吊机纵移。丁延书等^[4]提出,可通过增加施工平台或机械系统轨道来实现移动模架现浇箱梁施工的高度机械化。对于下部空间受限的桥梁吊装施工问题,王鑫等^[5]比选了多种吊装方案,确定采用“钢平台+起重支架”法进行下部空间受限的新建高架桥基础的吊装施工。

第二,对于双层钢梁桥施工技术问题^[6],王思伟等^[7]采用单层框架桥和双层框架桥相结合的顶进设计方案,有效减小了高覆土顶进施工时框架桥易扎头、路基易坍塌的风险。

第三,对桥梁吊装方案的一般性问题,主要围绕旧桥修复^[8]、温度力影响^[9-11]、匝道桥钢箱梁施工^[12-13]等问题展开研究。

第四,对于桥梁吊装方案的结构计算问题^[14-17],汪劲丰等^[18]提出剪刀撑加强方案,在梁段的腹板与顶板开口处及缺失腹板处沿顺桥向增设剪刀撑。采用 Midas Civil 建立有限元模型,分析吊装及安放过程中各梁块跨中处的位移与应力。叶锦华^[19]提出了龙门吊拆除旧梁的方法。针对龙门吊拆除空心板梁施工,基于 BIM 技术仿真模拟了龙门吊拆梁过程,得到施工控制参数。

上述文献研究表明,对于空间受限的钢箱梁施工问题,国内外已有学者进行了研究,但针对双层钢箱梁施工空间受限问题的相关研究较少。在软件应用方面,MIDAS 和 BIM 是进行结构分析和施工过程管理的有效软件。本文采用 Revit 软件对施工过程进行精细化 BIM 建模,确定关键控制参数;采用 BIM 模型细化双层钢箱梁临时支架搭设顺序,在 BIM 空间模型中确定吊车位置,解决双层钢箱梁施工空间受限问题;通过 Midas Civil 软件对施工过程中最不利工况进行临时支架、钢箱梁和基础检算,评估本文提出的方案的合理性。

2 工程背景

算例桥第三联为(62+80+70+50)m 的双层变截面钢箱梁结构,桥墩采用双层门架墩、桩

基础。钢箱梁节段预制,通过现场焊接形成整体。主梁采用三箱单室全焊钢箱梁,设6道纵腹板,其中左右线第3联变高钢箱梁,跨中及梁端标准梁高2.5m(钢箱梁中心线处),连续墩顶标准梁高3.6m,采用2次抛物线过渡,顶板全宽20.5m,单箱室顶板宽、底板宽均为3.3m,腹板采用直腹板设计,行车道外侧设置0.5m宽防撞护栏。顶板厚16~24mm,腹板厚16~20mm,底板厚18~24mm。左右线第4联等高钢箱梁,标准梁高2.7m(钢箱梁中心线处),顶板全宽20.5m,单箱室顶板宽3.3m,单箱室底板宽1.95m,腹板斜率4:1,行车道外侧设0.5m宽防撞护栏。顶板厚20mm,腹板厚16mm,底板厚24~40mm。钢箱梁沿路线设计线分节段制造出厂,现场吊装完成后,将各节段焊接成桥。为保证成桥后主梁线形,全桥均设置预拱度,预拱度由跨中向支点过渡,采用二次抛物线形式设置。钢箱梁按实际曲线线形设计,其两侧悬臂宽1.8m,悬臂根部高0.65m、端部高0.35m。

本项目钢箱梁施工时,先采用50t、100t汽车吊进行支架安装,再使用180t、220t、350t、450t汽车吊将钢箱梁直接吊装至成桥位置,并在支架上完成钢箱梁的精调及环缝、纵缝焊接作业。主要施工难点为:

(1)按传统的先施工下层钢箱梁再施工上层钢箱梁的方法,汽车吊工作半径受限。本文采用 Revit 软件对全桥吊装进行精细化分阶段建模模拟,可明确各施工阶段汽车吊泊位、吊装范围,解决其工作半径受限问题。

(2)支架利用率低下。为解决这一难题,本研究在 BIM 模型中对吊装顺序进行了空间推演,对支架安装顺序及钢箱梁吊装顺序进行了优化与细化。将原来的先施工全部下层结构再施工上层结构的方案优化为:先吊装下层右侧钢梁再吊装上层右侧钢梁,下层钢梁挑臂节段在上层钢梁全部吊装完成后再进行吊装,右侧结构吊装完毕后再吊装左侧结构。这一优化方案提高了支架利用率和吊装效率。临时支墩的结构形式如图1所示。

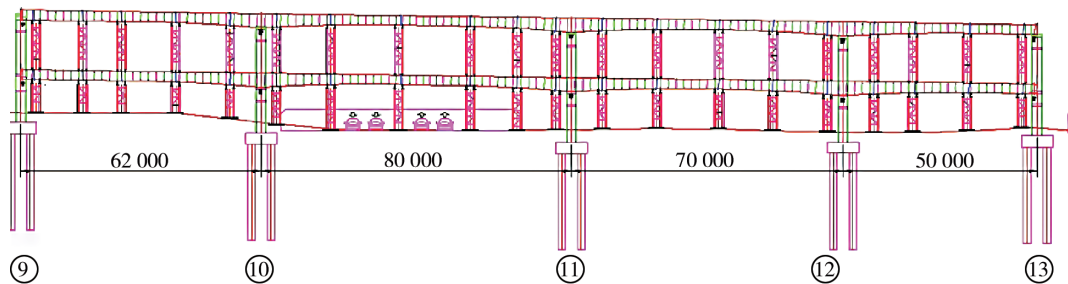


图1 第三联临时支架立面布置示意图

钢箱梁横向吊装顺序如图2所示。

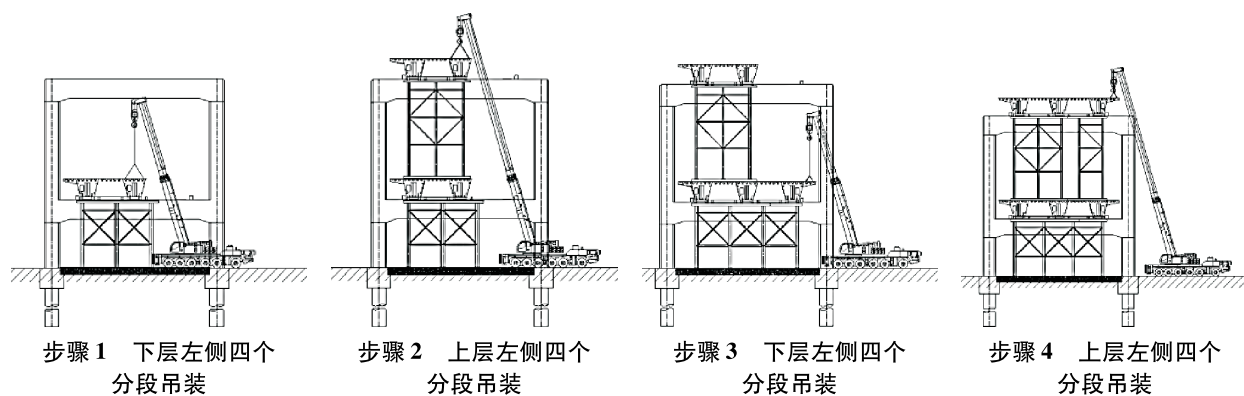


图2 钢箱梁横向吊装顺序

3 双层支架设计

3.1 计算荷载

施工过程中的荷载计算主要考虑钢箱梁吊装竖向荷载、施工荷载及风荷载。根据钢箱梁节段划分,选取用于验算的支架时,需考虑其承受的分段重量。钢箱梁各分段采用4个调平管支撑,调平管布置在支架分配梁上。施加竖向荷载时,考虑到各调平钢管受力的不均匀性,计算中引入1.2的不均匀系数进行调整;施工机具及人员荷载按 1 kN/m^2 考虑。

根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)^[20]附录表A.3,项目所在城市风速 25.6 m/s 小于10年重现期风速 29.8 m/s ,因此风力验算取工程所在地10年一遇标准风速,取值 25.6 m/s ;经计算,设计风压取 573.44 Pa 。

3.2 计算模型

采用MIDAS Civil专业有限元软件建立吊装支架的整体模型。钢管立柱、联结系、分配梁均采用梁单元模拟;根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[21]5.1.4条“框架结构梁柱连接宜采用刚接或铰接”的要求,结合实际工程特性,将分配梁与钢管立柱之间的连接调整为固定转动约束的刚性连接,以模拟实际工程中梁体可轻微滑动或转动的工况,避免产生与实际情况不符的弯矩;钢管立柱与平联、斜撑之间的连接同样模拟为铰接,该设置与现场采用角钢和小截面型钢通过节点板及高强螺栓连接的构造一致,契合其面外方向抗弯能力较弱的结构特点。支架焊接点采用共节点方式处理,铰接点采用释放梁端约束的方式处理,钢管立柱底部采用固端约束。

第3.1节所述各项荷载换算为相应节点及单元荷载施加至对应位置。对于立柱与分配梁连接

节点,采用立柱焊接、连接件与分配梁螺栓连接的构造形式(图3)。该连接以钢管立柱为竖向承力构件,通过贴焊于柱身的竖板连接件作为过渡传力部件,分配梁与竖板间采用螺栓刚性连接,并增设限位三角板优化贴合度。支架共计72个节点,120个单元。

此外,模型针对稳定系数相对较低的下层支架,开展了包含几何非线性和初始缺陷的非线性屈曲分析;按《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[21]第5.2.2条规定,初始缺陷取柱长的 $1/1\,000$,并以第一阶屈曲模态形式施加。分析结果表明,考虑非线性后下层支架的极限承载力安全系数仍满足临时结构对非线性稳定安全系数的要求。计算模型如图4所示。模型相关边界条件及荷载施加示意图5~8。

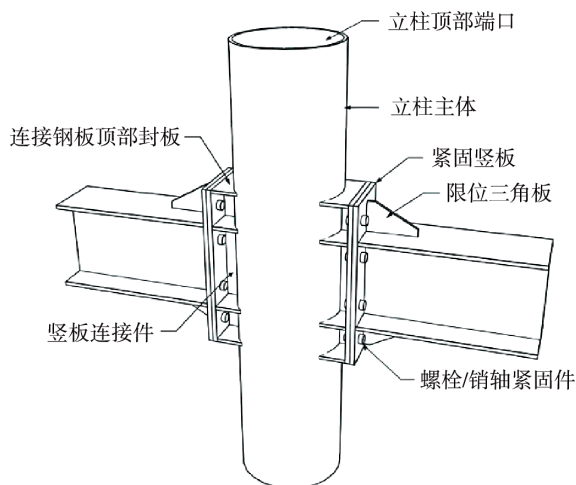


图3 立柱与分配梁连接结构示意图

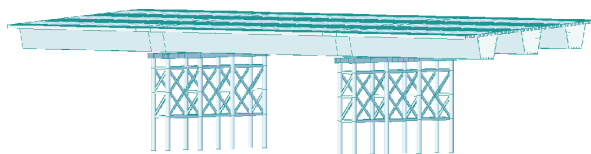


图4 主线钢箱梁下层吊架临时支架计算模型

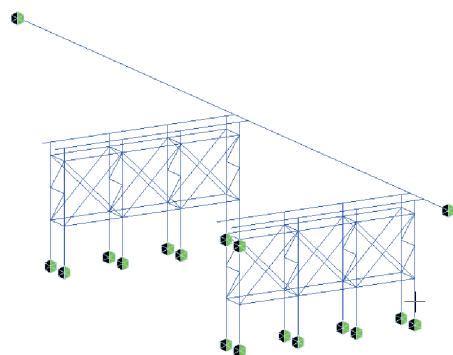


图5 球铰约束分布图

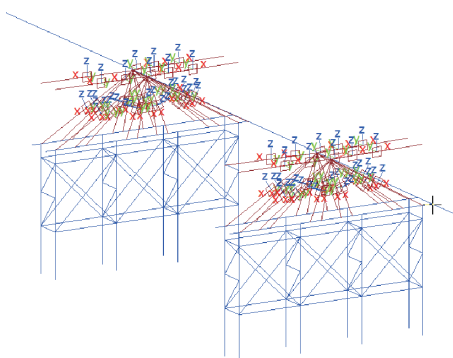


图6 刚性连接分布图

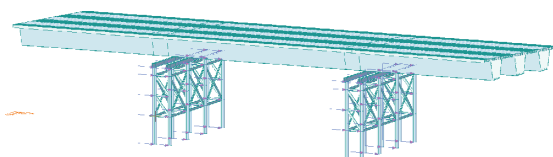


图7 风荷载分布图

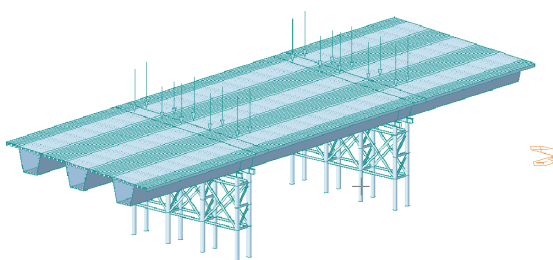


图8 自重荷载施加示意图

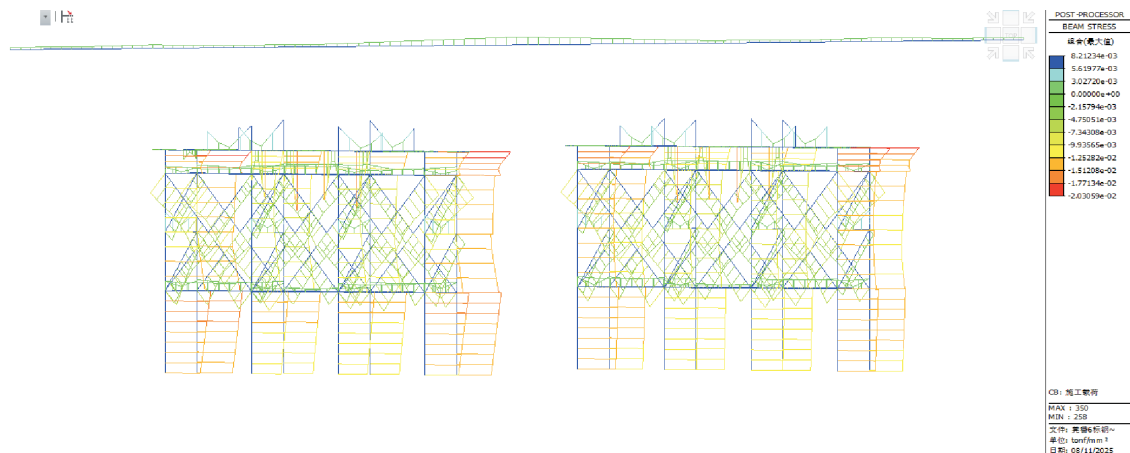


图9 验算截面选取与应力结果图(1)

3.3 计算结果

临时支架钢材采用 Q235 钢, 上层支架最大组合应力为 139.9 MPa (小于 170 MPa), 强度满足要求。临时支架在施工期间, 其弹性屈曲 (第一阶模态特征值) 安全系数不得小于 4.0; 根据《公路桥梁拆除工程技术规范 (征求意见稿)》^[22] 第 5.5.7 条规定, 临时支撑结构应进行稳定性验算, 弹性屈曲系数不得小于 4.0。经验算, 上层支架整体稳定性系数为 15.2 (大于 4.0), 下层支架整体稳定性系数为 4.4 (大于 4.0), 稳定性均满足规范要求。钢箱梁材料采用 Q355C 钢, 其最大组合应力为 21 MPa (小于 295 MPa), 强度满足规范要求。钢箱梁临时支架施工荷载最大组合应力如图 9 所示。

支架支反力最大位置浇筑混凝土面积为 $4 \text{ m} \times 17 \text{ m}$, 片体支架需整体浇筑混凝土, 混凝土厚度不小于 50 cm, 强度等级为 C25, MIDAS Civil 仿真模拟的钢管支架最大反力为 2 136.8 kN, 混凝土扩大基础浇筑面积 $A = 4 \text{ m} \times 17 \text{ m} = 68 \text{ m}^2$, 基础底部应力为 $2\,136.8/68 = 31.5 \text{ kPa}$ 。根据本项目《岩土工程勘察报告》, 场地浅层土层主要为淤泥质土及素填土, 天然地基承载力较低。为确保支架施工安全, 设计对地基处理提出如下要求: 对支架基础范围内的土层进行换填压实处理, 处理后的地基承载力特征值不应小于 50 kPa; 混凝土扩大基础底部承载力亦不应小于 50 kPa。综上, 该施工方案的地基承载力满足要求。该桥已于 2022 年 9 月完成主体施工, 施工监测数据与 MIDAS Civil 计算结果一致, 地基累计最大沉降为 22 mm, 相邻不均匀沉降差为 3 mm, 满足《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[23] 关于基础沉降验算的要求, 说明上述施工吊装方案设计及其计算结果是合理的。

根据结构对称性，关键验算截面选取了剪力最大截面和弯矩最大截面这两种最不利内力工况

的控制截面，如图 10 所示，其中红色框截面为剪切面，蓝色框截面为弯矩最大面。

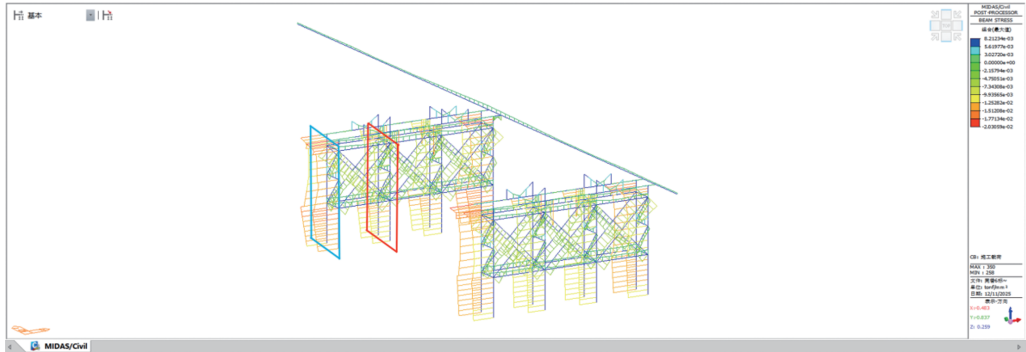


图 10 验算截面选取与应力结果图（2）

4 基于 Revit 技术的施工过程 BIM 建模模拟

4.1 BIM 模型构建与有限元数据协同机制

算例桥施工环境的主要矛盾在于，需要在密集路网与狭长的场地，安全、高效、按期完成一系列高难度跨越施工。需最大限度减少对市政交通和铁路运营的影响时间，且在狭小空间内实现多台大型机械的高效协同与安全作业，并确保整个线性工程吊装作业的连贯性与节奏性。所建算例模型信息深度等级为 LOD300，包含构件材料截面特性、常规工程量等物理属性信息，该深度等级可满足施工管理需求。同时，BIM 模型可通过数据接口导入 CIVIL、ANSYS 等有限元分析软件协同工作，实现力学性能、施工过程模拟与结构稳定性协同分析，具体交互流程如图 11 所示。

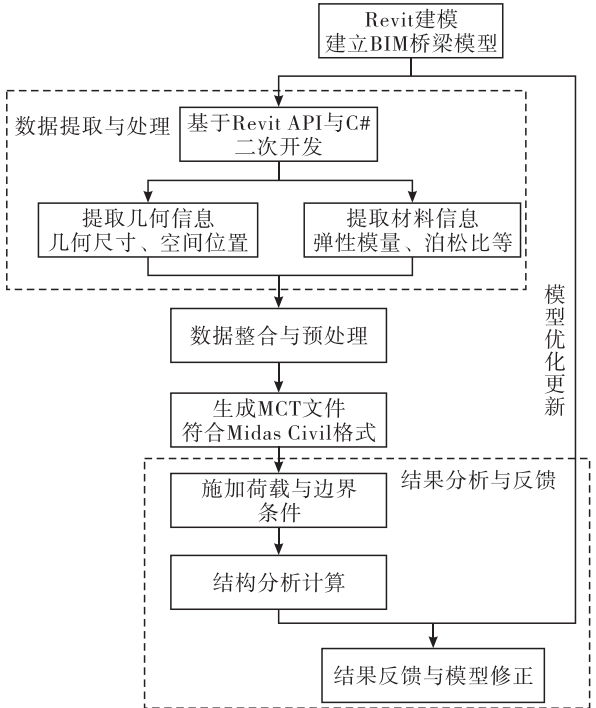


图 11 BIM 模型与有限元协同流程示意图

4.2 下部门架高支墩空间检查与施工优化

对于下部结构，桥墩原定施工步骤为：测量放样→下层墩身盖梁施工→上层墩身盖梁施工→覆盖养护。根据高支墩施工图（图 12）建立 BIM 模型（图 13），排查成桥结构与施工过程中的空间碰撞点，发现下层墩身盖梁施工完成后，易与上层墩身后续施工产生对接不准的问题。为此，对第 2、3 步施工步骤进行优化，调整了汽车吊趴位。优化后的施工步骤，可有效避免空间碰撞及对接不准的问题，结构上具备可行性。

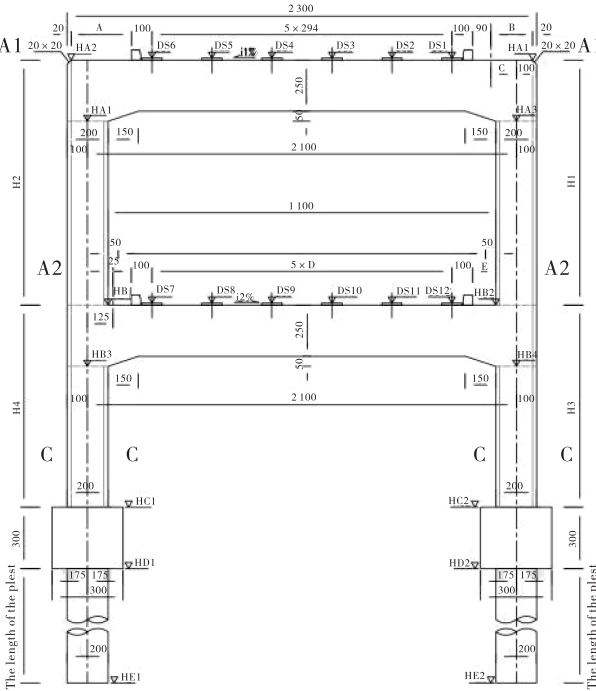


图 12 桥墩正立面图



图13 桥墩 BIM 模型

4.3 上部双层钢箱梁空间交错吊装推演与参数控制

对于上部结构施工步骤,以算例桥第三联为研究对象,通过 BIM 模型得出了吊装施工过程中的主要控制要素包括:钢箱梁吊点位置、现场存梁位置、汽车吊作业站位、汽车吊吊臂抬升角度范围、汽车吊吊臂旋转范围。同时,确定了上述参数的采集时间、采集频率及控制指标,有效指导了工程施工方案和安全措施的制定。

以下为 BIM 精细化模拟施工过程的模型分析,即下层部分施工完成后,进行该部分上层结构的交错流程放置,通过上述参数控制,使上层梁吊装可利用下层梁施工时的最优站位,从根本上规避空间遮挡问题。

步骤1:下层右侧钢箱梁第一节段吊装,采用一台 220 t 汽车吊吊装,作业半径为 14 m,臂长为 33.7 m,额定吊装吨位为 51 t,钢梁最大吨位为 37 t,负荷率为 72.5%,满足吊装要求。吊装过程 BIM 模型如图 14 所示。

步骤2:下层右侧钢箱梁第二节段吊装,吊装下层右侧钢梁,采用一台 450 t 汽车吊吊装,作业半径为 18 m,臂长为 37 m,额定吊装吨位为 72.3 t,钢梁最大吨位为 65 t,负荷率为 89.9%,满足吊装要求。吊装过程 BIM 模型图如图 15 所示。

步骤3:下层右侧钢箱梁第三节段吊装,吊装下层右侧钢梁,采用一台 220 t 汽车吊吊装,作业半径为 14 m,臂长为 33.7 m,额定吊装吨位为 51 t,钢梁最大吨位为 39 t,负荷率为 76.4%,满足吊装要求。吊装过程 BIM 模型图如图 16 所示。

步骤4:上层右侧钢箱梁第一节段吊装,采

用一台 220 t 汽车吊吊装,作业半径为 14 m,臂长为 33.7 m,额定吊装吨位为 51 t,钢梁最大吨位为 37 t;负荷率为 72.5%,满足吊装要求。吊车在与步骤 1 相同的有利站位作业,避免了传统方案中因下层结构遮挡而被迫增大半径的问题。

步骤5:上层右侧钢箱梁第二节段吊装,采用一台 450 t 汽车吊吊装,作业半径为 18 m,臂长为 37 m,额定吊装吨位为 72.3 t,钢梁最大吨位为 65 t;负荷率为 89.9%,满足吊装要求。

步骤6:上层右侧钢箱梁第三节段吊装,采用一台 220 t 汽车吊吊装,作业半径为 14 m,臂长为 33.7 m,额定吊装吨位为 51 t,钢梁最大吨位为 39 t;负荷率为 76.4%,满足吊装要求。吊装过程 BIM 模型图如图 17 所示。

步骤7:在右侧形成稳定框架后,上下层左侧钢箱梁三个分段按同样“先下后上、交错进行”的优化方案吊装,吊装参照步骤 1~6。

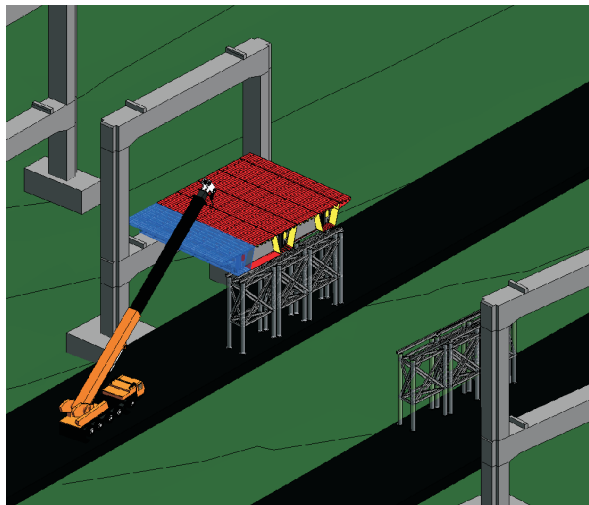


图14 下层右侧钢箱梁第一节段吊装 BIM 模型

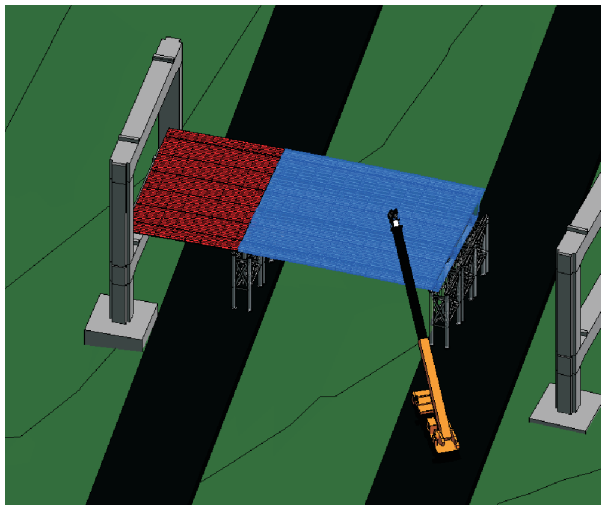


图15 下层右侧钢箱梁第二节段吊装 BIM 模型

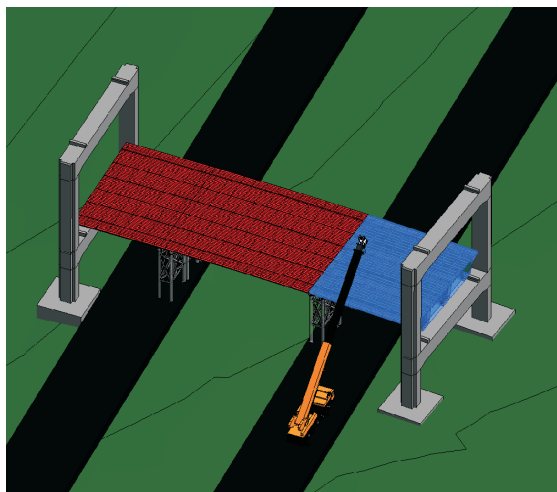


图 16 下层右侧钢箱梁第三节段吊装 BIM 模型

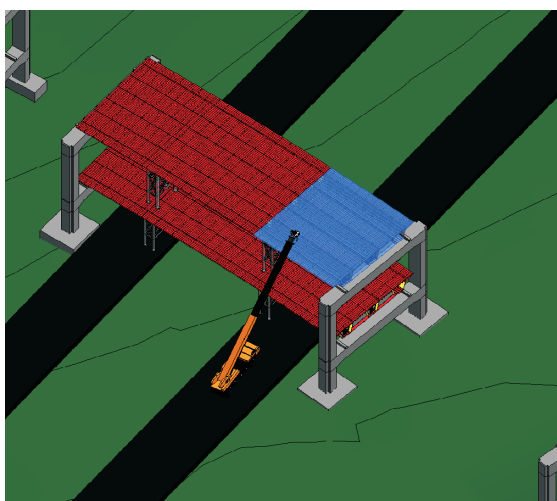


图 17 上层右侧钢箱梁第三节段吊装 BIM 模型

5 结论

本文针对双层钢箱梁施工过程中工作空间受限问题, 基于 BIM 建筑信息模型和 MIDAS Civil 结构分析模型, 以一座 $(62+80+70+50)$ m 双层变截面钢箱梁为例, 提出了有限空间双层钢箱梁吊装施工关键技术。主要结论有以下几点:

(1) 采用 MIDAS Civil 模型对临时支架进行设计计算, 验算了钢箱梁的强度、稳定性、地基承载力。计算结果与施工过程中实测数据一致, 表明本研究设计的临时支架结构可用于双层钢箱梁施工、本文提出的有限空间双层钢箱梁吊装工艺合理可行, 可推广应用于同类桥梁的施工。

(2) 本文提出的右侧下层钢箱梁→右侧上层钢箱梁→左侧下层钢箱梁→左侧上层钢箱梁的吊装顺序, 有效解决了双层钢箱梁施工过程中汽车吊工作半径受限的问题, 提高了双层钢箱梁的空

间利用效率, 保证了支架利用效率, 节省了建设成本。

(3) 通过 BIM 精细化建模模拟, 确定了钢箱梁吊装的关键控制参数为钢箱梁吊点位置、现场存梁位置、汽车吊作业站位置、汽车吊吊臂抬升角度范围、汽车吊吊臂旋转半径, 以及参数采集时间、采集频率和控制指标。

参考文献:

- [1] 方向升. 低净空下预制箱梁吊装方法研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2020(20): 134-136.
- [2] 陈玉发, 罗成. 多线大跨钢桁梁桥附属结构有限空间施工技术[J]. 工程技术研究, 2021, 6(4): 64-66.
- [3] 朱晓明, 付学军. 八尺门大桥钢箱梁桥面吊机施工关键技术[J]. 公路, 2018, 63(7): 230-234.
- [4] 丁延书, 魏维, 李兴林. 施工空间受限条件下移动模架一体化设计的改进[J]. 公路, 2020, 65(10): 156-159.
- [5] 王鑫, 祝新顺, 沈燕飞, 等. 在既有跨河公路桥上新建高架桥基础吊装设计与施工[J]. 世界桥梁, 2020, 48(1): 17-21.
- [6] 龙厚全, 辛保成. 苏州中环既有高架桥上吊装多层钢箱梁施工技术[J]. 钢结构, 2017, 32(12): 105-108, 100.
- [7] 王思伟, 宋晓东, 屈波. 下穿铁路双层框架桥设计与顶进施工[J]. 铁道建筑, 2021, 61(7): 41-45.
- [8] WILSON J C. Repair of new long-span bridges damaged by the 1995 Kobe earthquake [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2003, 17(4): 196-205.
- [9] KIM S H, PARK S J, WU J, et al. Temperature variation in steel box girders of cable-stayed bridges during construction [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 112: 80-92.
- [10] WANG J F, XU Z Y, FAN X L, et al. Thermal effects on curved steel box girder bridges and their countermeasures [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(2): 04016091.
- [11] LU H, HAO J, ZHONG J, et al. Analysis of sunshine temperature field of steel box girder based on monitoring data[J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 1-12.
- [12] WANG J, XIANG H, ZHANG J, et al. Geometric state transfer method for construction control of a large-segment steel box girder with hoisting installation[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2020, 21(5): 382-391.
- [13] HE J, LI X, LI C, et al. A novel asynchronous-pouring-construction technology for prestressed concrete box girder bridges with corrugated steel webs [C]// Structures. Elsevier, 2020, 27: 1940-1950.
- [14] 苗建宝, 骆佐龙. 港珠澳大桥大节段钢箱梁吊装过程

- 优化分析[J]. 公路, 2019, 64(3): 88-94.
- [15] 曾准. 基于 BIM 的临近高压线的高架桥钢箱梁施工技术[J]. 科技通报, 2021, 37(9): 99-102.
- [16] 邓海, 乐威. 武汉市二环线高架桥钢箱梁承载力研究[J]. 钢结构, 2015, 30(3): 42-45.
- [17] TIAN J, LUO S, WANG X, et al. Crane lifting optimization and construction monitoring in steel bridge construction project based on BIM and UAV[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 5512229.
- [18] 汪劲丰, 张良, 向华伟, 等. 城市钢箱梁桥横向分块施工分析[J]. 桥梁建设, 2017, 47(1): 109-113.
- [19] 叶锦华. 空间受限条件下龙门吊拆除旧梁关键技术研究[J]. 公路, 2021, 66(8): 175-180.
- [20] 交通运输部. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [22] 交通运输部. 公路桥梁拆除工程技术规范(征求意见稿)[S]. 北京: 交通运输部, 2020.
- [23] 交通运输部. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.

(上接第 26 页)

- [2] International Union of Railway. Brake-disc brakes and their application-general conditions for the approval of brake pads; UIC541-3[S]. 8th ed. Paris: International Union of Railway, 2017.
- [3] CHAU N, QUAN D, TAN N, et al. Numerical investigation of material and structural influence on transient temperature behavior in disc brakes during single-stop braking[J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2024, 42(4): 1337-1348.
- [4] 李杰, 王莉, 王晓燕, 等. 延缓高速列车制动盘热裂纹扩展的机理和关键技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(6): 26-42.
- [5] LI Z, WANG S, LI J, et al. Study on mechanism of radial long cracks propagation on sliding surface of wheel brake discs[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 159: 108123.
- [6] PANIER S, DUFRENOY P, WEICHERT D. An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes[J]. *Wear*, 2004, 256(7-8): 764-773.
- [7] KASEM H, BRUNEL J, DUFRENOY P, et al. Thermal levels and subsurface damage induced by the occurrence of hot spots during high-energy braking[J]. *Wear*, 2011, 270(5-6): 355-364.
- [8] 于文峰, 高祺洋, 段德莉, 等. 高速列车用闸片摩擦学行为与磨损寿命研究[J]. 摩擦学学报(中英文), 2025, 45(4): 557-570.
- [9] 蒋鑫池, 卢纯, 莫继良, 等. 考虑磨损率随温度变化的列车制动摩擦块高温磨损仿真分析[J]. 机械工程学报, 2024, 60(7): 195-202.
- [10] 周高伟, 段军军, 史月昆, 等. 制动过程中闸片材料与制动盘温度关系试验研究[J]. 润滑与密封, 2023, 48(1): 142-149.
- [11] 杨广楠, 吕宝佳, 宋跃超, 等. 轮装制动盘制动过程温度场位移场分析[J]. 铁道机车车辆, 2025, 45(3): 33-41.
- [12] GRZES P, OLIFERUK W, ADAMOWICZ A, et al. The numerical-experimental scheme for the analysis of temperature field in a pad-disc braking system of a railway vehicle at single braking[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, 75: 1-6.
- [13] YUAN Z, TIAN C, WU M, et al. Modeling and model validation of thermal behavior of railway disc during single braking[J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2021, 13(5): 051017.
- [14] YUAN Z, TIAN C, WU M, et al. A modified uniformly distributed heat source method for predicting braking temperature of railway brake disc[J]. *International Journal of Rail Transportation*, 2022, 10(2): 216-229.
- [15] 张庆贺, 卢纯, 吴元科, 等. 基于接触压力分布和非均匀热流密度的列车制动盘热耦合分析[J]. 机械工程学报, 2023, 59(3): 165-175.
- [16] 刘雄强, 卢纯, 孙田龙, 等. 多次制动工况下列车制动闸片摩擦块磨损行为的演变规律分析[J]. 摩擦学学报(中英文), 2025, 45(8): 1128-1139.
- [17] Surendra K, Sourav K, Nasir H. Parametric numerical study of the thermo-structural contact behavior of a brake disc/pad tribosystem[J]. *Journal of The Institution of Engineers*, 2025, 106(6): 1821-1830.
- [18] LIMPET R. Brake Design and Safety[M]. 3rd ed. Warrendale: SAE International, 2011.
- [19] BERGMAN T L, LAVINE A S, INCROPERA F P, et al. Fundamentals of Heat and Mass Transfer[M]. 8th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.