

DOI: 10.7672/sgjs2025120041

大跨度公轨合建连续钢桁梁桥顶推施工 数值仿真分析*

李阳¹, 赵炳震¹, 王之强², 王俊³, 王帆¹, 张司寒², 赵中伟⁴

(1. 陕西建工集团股份有限公司, 陕西 西安 710082; 2. 陕西建工机械施工集团有限公司, 陕西 西安 710032; 3. 陕西华山路桥集团有限公司, 陕西 西安 710026;
4. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

[摘要] 西安市地铁10号线一期工程渭河公轨合建桥为大跨度公轨合建连续钢桁梁桥, 主梁安装采用步履式顶推施工方法, 采用有限元软件 ANSYS 对大跨度公轨合建连续钢桁梁桥顶推施工过程进行数值仿真分析。通过固定钢桁梁桥位置, 将支墩位置逐步向与顶推相反方向移动的方法模拟顶推施工过程, 通过模拟不同的顶推施工距离, 揭示了施工典型位置钢桁梁杆件轴力的演变过程。结果表明, 整个顶推施工过程中, 本桥主桁变形满足规范限值要求。

[关键词] 桥梁; 钢桁梁桥; 大跨度; 数值模拟; 步履式顶推; 施工技术

[中图分类号] U445.462

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)12-0041-05

Numerical Simulation Analysis of Incremental Launching Construction of Long-span Road-rail Continuous Steel Truss Bridge

LI Yang¹, ZHAO Bingzhen¹, WANG Zhiqiang², WANG Jun³, WANG Fan¹, ZHANG Sihan², ZHAO Zhongwei⁴

(1. Shaanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710082, China;

2. SCEGC Mechanized Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China;

3. Shaanxi Huashan Road and Bridge Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710026, China;

4. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: Weihe River Road-rail Bridge of the first phase project of Xi'an Subway Line 10 is a long-span road-rail continuous steel truss bridge. The main girder was installed by walking incremental launching method. Finite element software ANSYS was used to carry out numerical simulation analysis on the incremental launching construction process of long-span road-rail continuous steel truss bridge. The method of fixing the position of the steel truss bridge and gradually moving the pier position to the opposite direction for the incremental launching was used to simulate the incremental launching construction process. The working conditions of different incremental launching construction distances were simulated, and the evolution process of the axial force at the typical position of the whole construction was revealed. The results show that the deformation of the main truss of the bridge is controlled within the standard limit during the whole incremental launching process, which meets the construction requirements.

Keywords: bridges; steel truss bridges; large span; simulation; walking incremental launching; construction

0 引言

将公路、铁路、市政道路和城市轨道交通等集成在同一座桥梁上, 能充分发挥桥位优势, 具有良好的可持续发展性^[1-3], 杭甬高速公路钱塘江大桥

* 陕西省交通运输厅交通科研项目(23-49); 陕西省住房和城乡建设厅科技项目(2023-K21)

[作者简介] 李阳, 高级工程师, E-mail: 154147572@qq.com

[收稿日期] 2024-07-18

的上部结构主桁分别采用步履式和拖拉式顶推方法从两侧向中跨施工,最后跨中直接合龙^[4]。赵小龙^[5]阐述了顶推法施工的工艺形式和顶推技术的技术要点。周建庭等^[6]针对重庆南纪门长江轨道专用桥北岸引桥,提出一种结合无应力状态法理论及应力增量评价法的顶推施工控制方法。Wu等^[7]研究了高差变化对顶推法施工全桥应力的影响。

西安市地铁10号线一期工程渭河公轨合建桥为大跨度公轨合建连续钢桁梁桥,主梁采用步履式顶推施工方法安装。本文采用有限元软件 ANSYS,通过固定钢桁梁桥位置,将支墩位置逐步向与顶推相反方向移动的顶推施工过程模拟方法,对大跨度公轨合建连续钢桁梁桥顶推施工过程进行数值仿真分析,模拟了不同的顶推施工距离和施工典型位置杆件轴力的演变过程,可为同类型大跨度连续钢桁梁桥施工和仿真分析提供借鉴和参考。

1 工程概况

西安市地铁10号线一期工程渭河公轨合建桥为西阎快速路与地铁10号线合并建设,结构为上、下分层公轨两用桥,上层布置6车道公路,下层布置4线公路、两线地铁,并悬臂布置两侧人行道。其中,跨渭河大桥长1412m,桥梁主跨为300m曲线上加劲连续钢桁梁桥,跨径布置如图1所示,桥跨布置为 $124 + 132 \times 2 + 168 + 300 + 168 + 132 \times 2 + 124 = 1412\text{m}$ 。

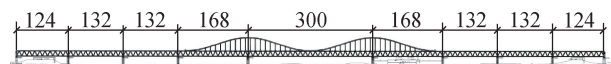


图1 跨径布置示意(单位:m)

Fig.1 Span arrangement(unit:m)

钢桁梁桥跨数多、跨径大,超高、超宽、超重钢桁梁节间难以整体运输进场,因此只能采用零散、小构件运输到现场进行散拼,南、北岸主桁顶推施工,在跨中合龙后,刚性加劲弦通过公路桥面运输,采用汽车式起重机站位于公路桥面架设,上部刚性加劲弦安装完成后,钢梁整体顶升,安装永久支座,最后落梁。

2 钢桁梁桥顶推施工

2.1 施工方法

西安市地铁10号线一期工程2标2工区渭河特大桥主桥共10个桥墩(W1~W10),主梁安装采用步履式顶推;为减少顶推过程中的悬挑长度,在各墩中部设置1个临时墩(W5~W6设置3个临时墩),共13个顶推临时墩(L01~L13),全桥共设置117个节间,节间长12m,顶推跨度以60,72m为主,最大跨度84m,如图2所示;两岸相向交替顶推施工

(南岸顶推分别为55节间664m(不含导梁4节间),北岸顶推62节间748m(不含导梁)),在中间合龙。全桥顶推重约54953t,其中南岸侧顶推总重为25832.61t,北岸侧顶推总重为29120.39t。主桁高12m,主桁间距30.5m,上加劲弦高32m。上、下弦杆均采用1.2m×1.6m箱形截面,腹杆为宽1.2m的H形或箱形截面,上加劲弦为1.4~3.2m变高箱形截面。



图2 顶推跨度布置(单位:m)

Fig.2 Layout of incremental launching span(unit:m)

钢桁梁采用1500t步履机结合滑块进行顶推施工,各墩墩顶布置如图3所示。步履机与滑块沿钢桁梁顺桥向在临时墩与永久墩上布置。此法利用步履机与钢桁梁下弦杆接触面产生的摩擦力来实现钢桁梁的向前滑移。且步履机竖向千斤顶的每次顶升位置都设计在钢桁梁节点处,步履机的顶升压力通过计算非节点下弦杆能承受的最大压力来确定,从而将步履机顶升压力限定在最大许可压力内,以保证钢桁梁结构安全。

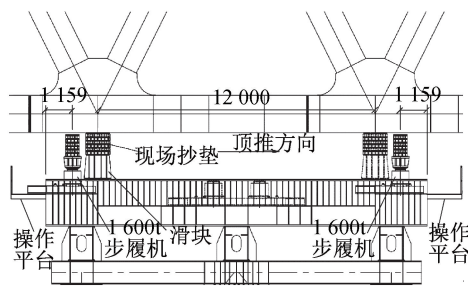


图3 各墩墩顶布置示意

Fig.3 Pier top layout of each pier

2.2 施工流程

2.2.1 安装步履机及支架

安装1500t步履机,步履机顶推方向线应与桥梁推动方向一致。

2.2.2 顶升千斤顶顶梁

将1500t油站设置为“顶升模式”,1500t步履机的顶升千斤顶在主梁节点处起顶钢桁梁,在钢梁节点下放置滑块。

2.2.3 水平千斤顶前移

顶升完毕后,步履机顶升千斤顶同步泄压,活塞回缩至梁底脱空;钢梁自重全部由滑块承受,检查各滑块顶有无脱空情况。通过控制系统同步控制水平千斤顶伸缸(60cm),并通过位移传感器将设定好的最大行程反馈给控制系统,当最大行程到达

设定值时,步履机整体停止顶推,保证整体顶推同步性能,期间利用步履机与钢梁底部的摩擦力将钢梁向前顶推。

2.2.4 顶升千斤顶落梁

主梁向前顶推 1 个行程后,1 500t 竖向千斤顶活塞缩缸回程,此时竖向千斤顶所受压力为 0,钢梁全部自重由滑块承受,梁体主体落到滑块上。

2.2.5 水平千斤顶收缸回程

1 500t 竖向千斤顶回程后,再将 1 500t 纵向水平千斤顶回程至初始位置。水平千斤顶回程时,通过位移传感器将设定好的最小行程反馈给控制系统,当回程到达设定值时,该步履机水平千斤顶自动停止回程。

2.2.6 循环步骤

重复以上步骤,直至主梁顶推 12m 后,再利用步履机竖向起顶钢梁,使滑块全部脱空后,将滑块回移 12m 至初始位置。

3 施工模拟分析

3.1 有限元模型

采用有限元软件 ANSYS 模拟施工过程,通过参数化分析语言 APDL 二次开发实现顶推施工仿真分析^[8]。采用 beam188 单元模拟连续钢桁梁,钢桁梁桥有限元模型如图 4 所示。上、下弦杆网格尺寸按顶推施工设置为 0.6m,即相邻两个节点间距为 0.6m,腹杆和拱的网格划分数量为 1;上下弦杆、腹杆和拱的截面如图 4 所示。钢材弹性模量为 2.5GPa,泊松比为 0.3。

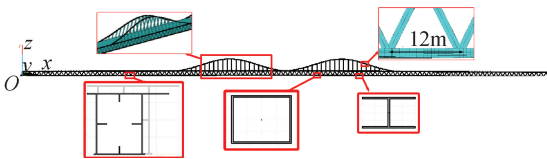


图 4 钢桁梁桥数值模型

Fig. 4 Numerical model of steel truss bridge

3.2 顶推滑移施工数值算法

由于钢桁梁桥整体对称,选取半跨进行数值分析,共 11 个支墩,如图 5 所示,半跨的顶推跨度为 $64+60+72+60+72+60+84+84+72+72=700\text{m}$ 。通过固定钢桁梁桥位置,将 11 个支墩位置逐步向与顶推相反的方向移动,利用反方向移动支墩约束的方法模拟顶推施工过程。首先建立钢桁梁桥整体有限元模型并“杀死”所有单元;然后基于施工过程,逐步激活钢桁梁施工单元,并逐步反方向移动 11 个支墩,顶推滑移施工过程如图 5 所示,钢桁梁红色部分为激活的施工单元,黑色竖线为永久支墩,红色竖

线为临时支墩;根据实际施工方案,利用竖向千斤顶将下弦反力设置为 300kN,同时约束下弦与抄垫接触位置的竖向位移。

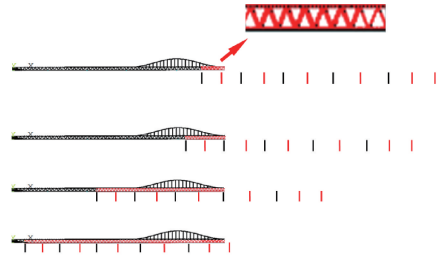


图 5 顶推滑移施工数值分析方法

Fig. 5 Numerical analysis method of thrust slip construction

4 典型工况变形计算结果

4.1 顶推滑移施工 60m 工况

激活钢桁梁端部 64m 内的梁单元,根据顶推滑移施工 60m 的工况,在节点位置施加约束条件,钢桁梁桥顶推滑移施工 60m 工况和应力云图如图 6, 7a 所示,桁架构件主要是轴向受力,两端约束处应力最大,其他位置应力均较小,桁架整体应力较均匀,节点处无明显应力集中情况。位移云图如图 7b 所示,钢桁架 z 向最大变形为 -15.6mm ,出现在跨中位置,桁架两端约束处的 z 向最大变形为 3.2mm ,挠跨比为 $15.6/60\ 000 = 1/3\ 846 < 1/400$,变形满足要求^[9]。由图 7 可知,有限元模型可较好地模拟钢桁梁桥顶推施工过程,对顶推施工过程进行有效评估和预测。

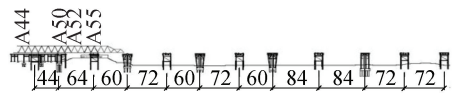


图 6 顶推滑移施工 60m 工况(单位:m)

Fig. 6 The working condition of 60m in thrust slip construction(unit: m)

4.2 顶推滑移施工 420m 工况

根据顶推滑移施工 420m 工况激活钢桁梁端部 420m 内的梁单元,在节点位置施加约束条件。顶推滑移施工 420m 工况和应力云图如图 8, 9a 所示,有限元分析表明,最大应力出现在各支墩处,应力值达到 50MPa,桁架整体应力较均匀,节点处无明显应力集中情况。位移云图如图 9b 所示,钢桁架 z 向最大变形为 -18.1mm ,出现在桁架约束位置间的跨中处,桁架约束位置处的 z 向最大变形为 1.5mm ,挠跨比 $15.6/60\ 000 = 1/3\ 315 < 1/400$,变形满足要求^[9]。

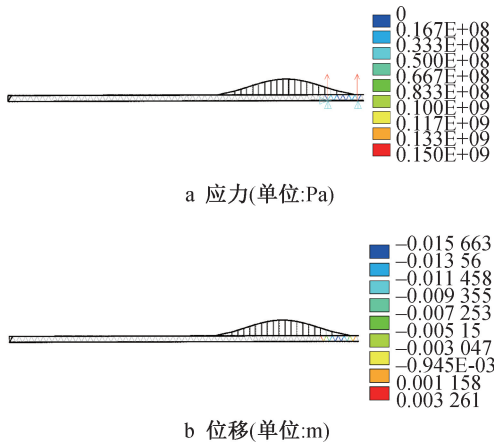


图7 顶推滑移施工 60m 应力与位移云图

Fig. 7 The stress and displacement of 60m in thrust slip construction

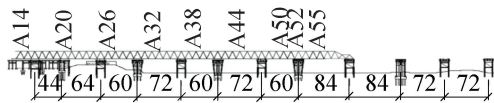


图8 顶推滑移施工 420m 工况(单位:m)

Fig. 8 The working condition of 420m in thrust slip construction(unit: m)

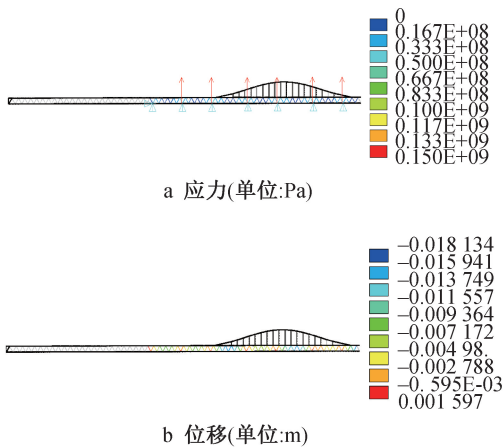


图9 顶推滑移施工 420m 应力与位移云图

Fig. 9 The stress and displacement of 420m in thrust slip construction

4.3 顶推滑移施工 534m 工况

根据顶推滑移施工 534m 工况,激活钢桁梁端部 534m 内的梁单元,在有限元模型节点位置施加约束条件。顶推滑移施工 534m 工况和应力云图如图 10, 11a 所示,在约束位置均出现较大应力,数值达到 50MPa,桁架整体应力较均匀,节点处无明显应力集中情况。位移云图如图 11b 所示,钢桁架 z 向最大变形为 -22.1mm ,出现在桁架约束位置间的跨中处,桁架约束位置处的 z 向最大变形为 1.5mm ,根据 z 向位移正负号可很好地判断其变形状态,挠

跨比 $15.6/60\ 000 = 1/2\ 715 < 1/400$,变形满足要求^[9]。

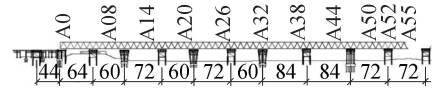


图10 顶推滑移施工 534m 工况(单位:m)

Fig. 10 The working condition of 534m in thrust slip construction(unit: m)

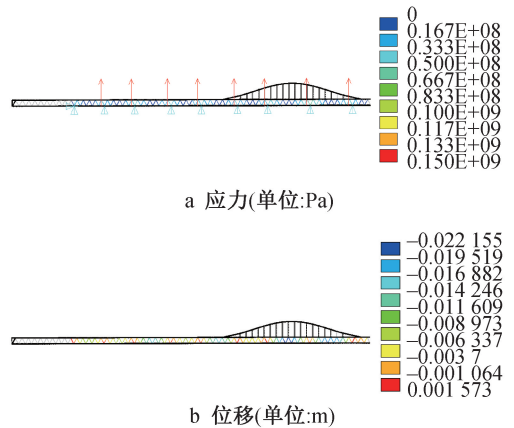


图11 顶推滑移施工 534m 应力与位移云图

Fig. 11 The stress and displacement of 534m in thrust slip construction

4.4 整个施工典型位置演变过程

钢桁梁桥从开始拼装至顶推合龙完成,期间经历多次体系转换,结构自重不断增加,临时荷载变化频繁,桁架杆件应力和变形在整个施工过程中也处于持续变化过程中^[10]。作为结构安全状态的重要指标,对钢桁梁杆件应力和变形进行评估具有重要作用。

半跨钢桁梁桥应力云图如图 12 所示,得到钢桁架 3 个典型节点位置轴力随顶推滑移施工的变化曲线(见图 13)。根据节点轴力正负号可很好地判断其拉压受力状态。

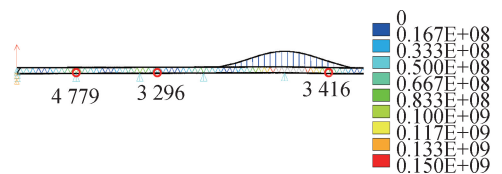


图12 半跨钢桁梁桥应力云图(单位:Pa)

Fig. 12 The stress of half-span steel truss bridge(unit: Pa)

整体钢桁梁桥应力云图如图 14 所示。钢桁架 z 向最大变形为 -22.1mm ,出现在桁架跨中处,挠跨比 $5.2/48\ 000 = 1/9\ 231 < 1/400$,变形满足要求^[9]。结合步履式顶推滑移施工特点和有限元仿真分析可知,通过固定钢桁梁桥位置,将支墩约束位置逐

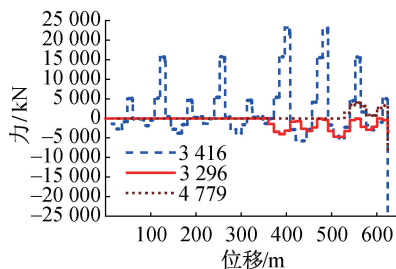


图 13 施工典型节点位置演变过程

Fig. 13 Evolution process of typical node position in construction

步向与顶推相反方向移动的顶推施工过程模拟方法行之有效。

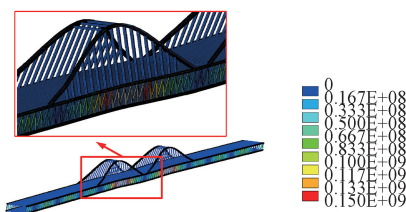


图 14 钢桁梁桥应力云图(单位:Pa)

Fig. 14 Stress of steel truss bridge(unit:Pa)

5 结语

本文对大跨度公轨合建连续钢桁梁桥顶推施工进行数值仿真分析,模拟了不同顶推距离,揭示了施工典型位置轴力的演变过程。结果表明,根据节点轴力的正负号可很好地判断其拉压受力状态。挠跨比 $<1/400$,变形满足要求。通过固定钢桁梁桥位置,将支墩约束位置逐步向与顶推相反的方向移动的顶推施工过程模拟方法可准确高效模拟钢桁梁桥顶推施工过程。

参考文献:

- [1] 龚俊,张燕飞. 公铁两用双层钢-混组合梁设计关键技术 [J]. 桥梁建设, 2020, 50(S2): 88-93.
GONG J,ZHANG Y F. Key design techniques for steel-concrete composite girder of two-deck rail-cum-road bridge [J]. Bridge construction, 2020, 50(S2): 88-93.
- [2] 陈星宇,徐昕宇,宋晓东,等. 考虑附加变形的公路-磁浮合建桥车桥耦合动力响应研究 [J]. 桥梁建设, 2021, 51(2): 71-77.

CHEN X Y, XU X Y, SONG X D, et al. Study of vehicle-bridge coupling dynamic response of a combined highway and maglev bridge considering additional deformation [J]. Bridge construction, 2021, 51(2): 71-77.

- [3] 刘传志,妥鹏. 平潭海峡公铁两用大桥元洪航道桥塔墩顶钢梁施工技术 [J]. 世界桥梁, 2019, 47(2): 39-43.
LIU C Z, TUO P. Construction techniques for pier-top steel girders of Yuanhong Ship Channel Bridge of Pingtan Straits Railcum-road Bridge [J]. World bridges, 2019, 47(2): 39-43.
- [4] 李良军. 多跨长联公轨合建钢桁梁桥顶推施工控制技术研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2022(7): 113-117, 131, 18.
LI L J. Research on incremental launching construction control technology of multi-span long-connected highway track co-construction steel truss bridge [J]. Urban roads bridges & flood control, 2022(7): 113-117, 131, 18.
- [5] 赵小龙. 顶推法在桥梁施工过程中的应用 [J]. 山西建筑, 2018, 44(4): 175-176.
ZHAO X L. The analysis of the influence of the cable of the cable-bridge cable on the rest of the cable [J]. Shanxi architecture, 2018, 44(4): 175-176.
- [6] 周建庭,李轩,吴月星,等. 大跨轨道钢箱叠合梁桥顶推施工控制方法 [J]. 世界桥梁, 2021, 49(3): 64-71.
ZHOU J T, LI X, WU Y X, et al. Incremental launching construction method for long-span light rail bridge with main girder composed of steel boxes and concrete slabs [J]. World bridges, 2021, 49(3): 64-71.
- [7] WU X, WU T T, CHEN W Z. Analysis of height difference between three trusses of a steel truss bridge during incremental launching [J]. Stahlbau, 2018, 87(9): 910-922.
- [8] 王立国,廖巍巍,张振雨,等. 山东渤海先进技术研究院巨型钢桁架设计 [J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 1155-1158.
WANG L G, LIAO W W, ZHANG Z Y, et al. Design of giant steel truss of Shandong Bohai Advanced Technology Research Institute [J]. Building structure, 2022, 52(S1): 1155-1158.
- [9] 中冶京诚工程技术有限公司. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Capital Engineering & Research Incorporation Ltd. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [10] 郑晏华. 装配式城市高架桥预制桥墩、桥梁的运输方法 [J]. 建筑施工, 2019, 41(3): 354-355.
ZHENG Y H. Transportation method for precast pier and beam of prefabricated urban viaduct [J]. Building construction, 2019, 41(3): 354-355.