

DOI: 10.7672/sgjs2025240040

# 大跨公铁两用连续钢桁梁拼装过程受力分析\*

周君<sup>1</sup>, 翁方文<sup>1</sup>, 梁玉雄<sup>2</sup>, 张锋<sup>2</sup>, 傅梅珍<sup>2</sup>

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;

2. 华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 江西 南昌 310031)

[摘要] 大跨公铁两用连续钢桁梁施工过程中的受力关乎桥梁施工期间的结构安全, 为分析各施工阶段不同工况下公铁两用连续钢桁梁的受力特性, 依托新建京港高速铁路南昌扬子洲赣江公铁大桥中支主桥, 建立有限元模型, 分析了桥梁拼装过程中主梁应力和变形, 并进行了施工过程中关键参数对主梁应力和变形的参数敏感性分析。结果表明: 采用支架拼装施工法钢桁梁主梁拼装时最大悬臂阶段的弦杆最大拉应力为 35.5MPa, 主梁拼装时最不利工况最大悬臂阶段的中跨最大竖向位移为 7.6mm, 支架在施工过程中应力和变形均较小, 易于钢桁梁安装精度的控制; 上层公路二期、下层公路二期、下层铁路二期施工阶段的中跨竖向位移分别为 -81.9、-93.8、-117.5mm, 二期恒载对主梁竖向变形影响大; 由主梁刚度和自重误差敏感性分析可知, 梁重变化 2%, 中跨跨中挠度变化 2.4mm, 刚度变化 2%, 中跨跨中挠度变化 2.3mm, 因此主梁刚度和自重施工误差可限制在 2% 以内; 施工过程中上、下层温差 20℃ 时边跨跨中产生 3.8mm 挠度, 施工时需关注上、下层桥面温差效应对主梁变形的影响。

[关键词] 桥梁; 公铁两用桥; 连续钢桁梁; 拼装; 有限元分析; 受力特性

[中图分类号] U441

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)24-0040-06

## Force Analysis of the Assembly Process of Long-span Combined Rail-cum-road Continuous Steel Truss Girder

ZHOU Jun<sup>1</sup>, WENG Fangwen<sup>1</sup>, LIANG Yuxiong<sup>2</sup>, ZHANG Feng<sup>2</sup>, FU Meizhen<sup>2</sup>

(1. CCCC Second Harbour Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China;

2. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 310031, China)

**Abstract:** The mechanical characteristics of the long-span combined rail-cum-road continuous steel truss girder in construction is related to the structural safety of the bridge. Therefore, in order to analyze the force characteristics of the bridge in each construction stage, finite element method is used to calculate the force and deformation of the main girder of the Ganjiang River Central Branch Rail-cum-road Bridge of Beijing-Hong Kong High-speed Railway, which is located in Nanchang Yangtze River. The parameter sensitivity analysis of the stress and deformation of the main girder in construction process is also studied. The results show that: The maximum tensile stress of the chord is 35.5MPa, and the maximum vertical displacement of the mid-span of the main girder is 7.6mm at the maximum cantilever stage, which is the worst-case condition by the assembly construction method with the bracket, and the stress and deformation in construction process are small and it is easy to control the installation accuracy of the steel truss; The mid-span vertical displacements of the deck paving construction of the upper highway, the lower highway and the lower railway are -81.9mm, -93.8mm, -117.5mm, and the constant load of deck pavement has a great impact on the vertical deformation of the bridge; By the girder stiffness and weight error sensitivity analysis, the girder weight changes by 2%, the mid-span deflection changes by 2.4mm, while the stiffness changes by 2%, the mid-span deflection changes by 2.3mm, so the main girder stiffness and weight construction error can be limited within 2%; In construction process, the

\* 中国国家铁路集团科技研究计划(N2023G040); 国家自然科学基金(52068022)

[作者简介] 周君, 高级工程师, E-mail: 3831368998@qq.com

[收稿日期] 2024-12-20

temperature difference of the upper and lower bridge decks has a great impact on the deformation of the main girder, when the temperature difference between the upper and lower bridge decks is  $20^{\circ}\text{C}$ , the deflection in the side span is 3.8mm, the temperature difference of the upper and lower bridge decks should be paid attention to in construction.

**Keywords:** bridges; combined rail cum road bridges; continuous steel truss girders; assembly; finite element analysis; force characteristics

## 0 引言

钢桁梁桥因跨越性强、受力性能好、施工工期短、造型美观而被广泛应用于我国铁路建设中<sup>[1-2]</sup>。钢桁梁根据其结构特点可做成双层桥面,因此尤其适用于公铁两用桥。近年来我国高速铁路快速发展,为了节约资源和保护环境,高速铁路经常与公路采用混层合建钢桁梁桥型。大跨度公铁两用混层连续钢桁梁受力状态复杂,具有较强空间效应,施工过程中的桥梁受力会直接影响钢桁梁线形、应力水平,其施工控制难度远大于常规钢桁梁桥。

目前国内连续钢桁梁桥常见的施工方法主要有悬臂拼装法<sup>[3-5]</sup>、顶推施工法<sup>[6-7]</sup>和浮运架设法<sup>[8]</sup>。国内外对钢桁梁桥施工过程的受力和控制方案进行了研究。Wu等<sup>[9]</sup>采用有限元模拟方法分析了一座双层铁路钢桁梁桥在顶推施工过程中的整体应力和局部应力,得出了应力允许范围内的桁架高度施工误差允许值。王玲等<sup>[10]</sup>采用 MIDAS Civil 软件模拟钢桁梁悬臂拼装过程的受力状态和线形控制方法,表明设置预抬高的线形控制方法实用有效。李兆峰等<sup>[11]</sup>对顶推施工中钢桁梁桥关键节点进行力学分析,评估了大型钢桁梁顶推施工的可行性和安全性。田亮等<sup>[12]</sup>研究了钢桁梁顶推施工过程中的动力学特性,得出在顶推初始阶段滑块与滑道梁接触面的受力、变形不均匀,主体和临时结构的应力和变形较大,结构偏于危险。娄松等<sup>[13]</sup>对顶推施工中钢桁梁桥步履式顶推滑移施工力学行为进行了分析,得出步履机与下弦杆间的摩擦系数及滑道与滑块间的摩擦系数比值越大,可实现的顶推质量越大、顶推能力越强。赵汗青等<sup>[14-15]</sup>以郑济铁路郑州黄河特大桥连续钢桁梁合龙施工为例建立有限元分析模型,分析了日照温差、合龙口临时墩起顶和合龙口上下游对拉对钢桁梁合龙偏差敏感性的影响,根据分析结果确定合龙方案。何源等<sup>[16]</sup>通过有限元模拟对钢桁梁桥不同施工线形控制方案进行了量化评价,得出上弦杆伸缩量控制的最优方案。姜贺等<sup>[17]</sup>通过有限元软件及 BIM 模型模拟每个节间钢桁梁杆件拼装顺序及受力情况,研究了济阳黄河公铁两用特大桥施工关键技术,以保

证各杆件安装就位准确。陈淮等<sup>[18]</sup>为分析长联大跨连续钢桁梁节点板在悬臂拼装施工最不利阶段时的局部受力情况,建立节点板局部有限元模型,得到节点板的应力分布情况。

在大跨度公铁两用连续钢桁梁施工过程中,受施工误差、环境温湿度、荷载、临时结构沉降等多种因素影响,施工过程中的受力特性直接关系到桥梁工程整体结构的质量安全及成桥线形。本文以新建京港高速铁路九江—南昌段南昌扬子洲赣江公铁大桥中支主桥为例,研究大跨度公铁两用连续钢桁梁采用拼装架设法施工过程中钢桁梁的受力特性,进行施工过程中关键参数对主梁应力和变形的参数敏感性分析。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

南昌扬子洲赣江公铁大桥是昌九高速铁路和南昌市北二环跨赣江的共用通道,是一座集高速铁路、城市快速干道、城市主干道 3 种交通方式于一体的大跨度公铁合建桥梁,如图 1 所示,桥梁全长 18.95km,公铁合建段全长 4.957km,桥面分上、下层布置,上层搭载 8 车道城市快速干道,下层搭载双线高速铁路和 4 车道城市主干道。赣江公铁大桥位于南昌市英雄大桥上游,如图 2 所示,公铁合建段赣江中支主桥采用  $(78+134+152+134+78)\text{m}$  钢桁连续梁桥,采用三角形桁式,2 种标准节间长 12, 13m, 2 片主桁,桁中心距 15.9m。

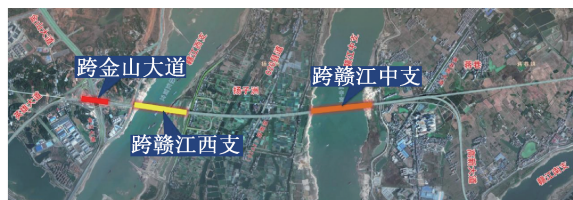


图 1 赣江公铁大桥中支主桥卫星图

Fig. 1 Satellite map of the Ganjiang River Central Branch Rail-cum-road Bridge

赣江中支主桥钢桁梁采用上、下带挑臂的板桁组合断面,钢桁梁断面如图 3 所示。

### 1.2 施工方案

赣江中支主桥采用“浮式起重机原位支架法”

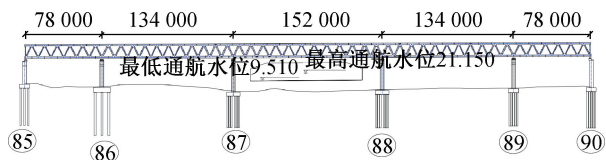


图 2 赣江公铁大桥中支主桥桥型总体布置

Fig. 2 Overall layout of bridge type of the Ganjiang River Central Branch Rail-cum-road Bridge

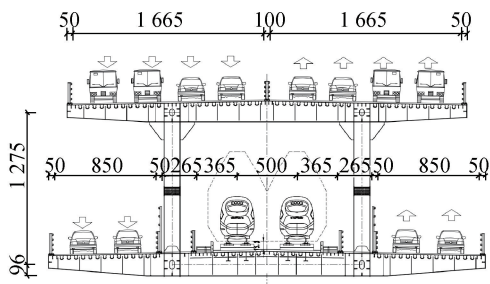


图 3 钢桁梁横断面(单位:cm)

Fig. 3 Cross section of steel truss girder (unit:cm)

施工方案。钢箱板桁组合梁构件在工厂制造完毕且试装、预拼装完毕后,根据计划分批进场。在全桥钢桁梁下弦杆节点处布置的临时支墩拼装支架上进行拼装施工,如图 4 所示。

主跨跨中处预留 26m 通航孔,采用浮式起重机安装钢桁梁杆件。施工时先安装下层桁梁杆件,含下弦杆、下层桥面、一半的斜杆,再安装上层桁梁杆件,含上弦杆、上层桥面、一半的斜杆,最后在中跨合龙。

拼装施工时在主墩及临时墩上设置大吨位千斤顶,通过顶落梁调节钢桁梁高程和转角,通过温度或纵移措施调节合龙间距,在设计合龙温度下进行钢桁梁合龙施工,合龙段采用悬臂拼装(见图 5)。钢桁梁安装完成及体系转换后,拆除所有临时设施和吊装设备,进行后续公路二期、铁路二期及其他附属工程施工。

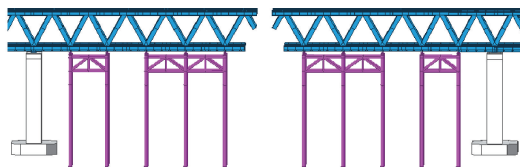


图 5 钢桁梁合龙段

Fig. 5 Closure section of steel truss girder

## 2 钢桁梁安装过程模拟分析

### 2.1 有限元模型建立

采用有限元软件 MIDAS Civil 建立三维空间有限元模型,进行拼装全过程受力计算。主桁、横联和桥面纵横梁等采用梁单元模拟,桥面板离散为板单元模拟,U 肋折算成板厚计入模型。全桥共 6 002 个结点、13 140 个单元,支架与主梁约束采用仅受压弹性连接。边界条件按实际施工步骤进行添加,考虑结构自重、温度、施工临时荷载等作用效应,按施工拼装步骤依次“激活”相应施工步内的构件单元和荷载,进行施工阶段全过程模拟分析。

### 2.2 荷载

结构自重:钢结构重度为  $78.5 \text{ kN/m}^3$ ,并考虑横隔板等荷载,钢结构自重按实际加载。钢桁梁弦杆自重采用梁单元荷载施加到模型;铁路桥面二期恒载为  $40.99 \text{ kN/m}$ ,上层公路二期恒载为  $82.61 \text{ kN/m}$ ,下层公路二期恒载为  $71.10 \text{ kN/m}$ 。二期恒载和桥面板自重均采用平面荷载施加到模型,节点板自重采用节点荷载,如图 6 所示。

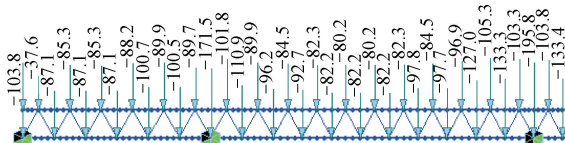


图 6 自重荷载施加(单位:kN)

Fig. 6 Self-weight load (unit:kN)

### 2.3 施工阶段划分

根据施工方案进行桥梁施工全过程模拟分析

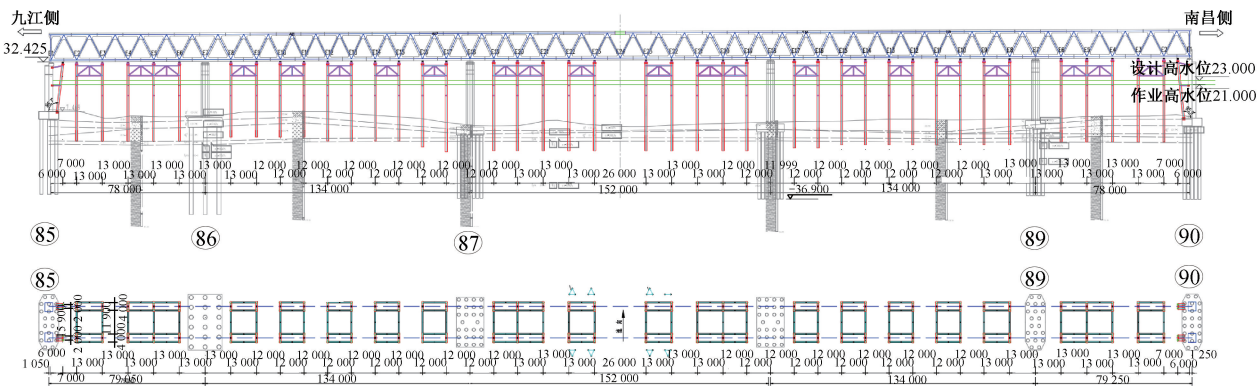


图 4 拼装施工支架布置

Fig. 4 Scaffold layout in assembly construction

时,有限元模型中主要代表性施工阶段如图 7 所示。

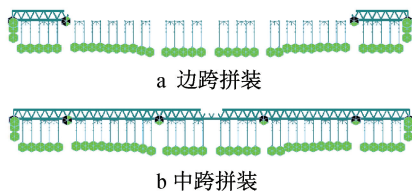


图 7 有限元模型主要代表性施工阶段

Fig. 7 The main representative construction stages in the finite element model

### 3 安装过程的模拟分析结果

#### 3.1 施工阶段主梁应力及位移分析结果

各主要代表性施工阶段各跨钢桁梁弦杆最大应力如表 1 所示,拼装至边跨主梁第 5 个节段时主梁和支架的应力和变形如图 8 所示。主梁拼装至最大悬臂阶段时弦杆最大拉应力为 35.5MPa,在中跨合龙后最大拉应力为 38.1MPa。上层公路二期、下层公路二期、下层铁路二期施工阶段的最大应力分别为 70.4,102.8,131.1MPa。以上结果表明,主梁拼装阶段应力水平较低,拆除支架后应力显著增加。

表 1 各施工阶段各跨钢桁梁弦杆最大拉应力

Table 1 The maximum tensile stress of the chord at each span steel truss girder in each construction stage

MPa			
施工阶段	边跨最大应力	次边跨最大应力	中跨最大应力
最大悬臂阶段	25.6	28.0	35.5
中跨合龙	25.7	36.3	38.1
拆除临时支架	42.6	51.9	59.5
上层公路二期	53.5	76.4	67.1
下层公路二期	59.2	86.1	69.1
下层铁路二期	70.4	102.8	131.1

各主要施工阶段主梁控制截面最大竖向位移计算值如表 2 所示。由表 2 可知,在主梁拼装时最不利工况最大悬臂阶段的中跨最大竖向位移为 7.6mm,拆除支架后边跨、次边跨和中跨主梁的竖向位移分别为-21.8,-53,-68.1mm。

表 2 各施工阶段主梁控制截面最大竖向位移

Table 2 The maximum vertical displacement of control section of main girder in each construction stage

mm			
施工阶段	边跨跨中最大位移	次边跨最大竖向位移	中跨最大竖向位移
最大悬臂阶段	-7.7	-6.7	-7.6
中跨合龙	-7.7	-6.6	-9.0
拆除临时支架	-21.8	-53.0	-68.1
上层公路二期	-24.9	-63.2	-81.9
下层公路二期	-27.5	-71.9	-93.8
下层铁路二期	-32.8	-89.4	-117.5

注:位移向下为负

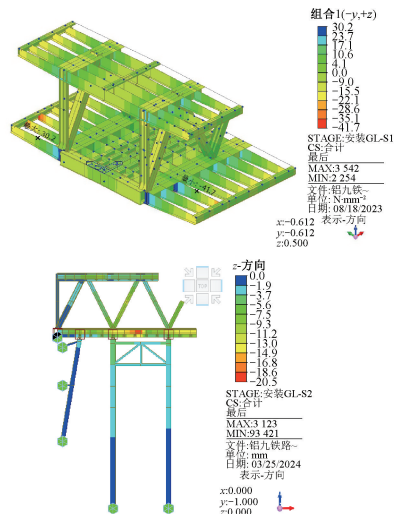


图 8 拼装边跨阶段应力和变形

Fig. 8 Stress and deformation in assembling side span stage

表 2 中桥面二期恒载的施加顺序依次按上层公路二期、下层公路二期、下层铁路二期的加载顺序分析,得到上层公路二期、下层公路二期、下层铁路二期施工阶段的中跨竖向位移分别为-81.9,-93.8,-117.5mm,可见二期荷载对主梁竖向变形影响较大。

上述各施工阶段位移分析结果表明,在支架原位拼装阶段位移较小,相对于悬臂拼装施工或顶推施工方法,更便于安装精度的控制。而在拆除支架后,随着上、下层桥面二期施工的逐步开展,桥梁位移显著增加,因此下层铁路二期施工阶段铺设铁路无砟轨道前,可通过上、下层公路二期的荷载-变形曲线对桥梁整体刚度进行修正,以此预测和控制无砟轨道安装高程。

#### 3.2 施工阶段支架应力与位移分析

主梁拼装过程中最不利工况最大悬臂阶段的支架应力如图 9a 所示,支架最大拉应力为 61.6MPa,最大压应力为 96.3MPa,均小于钢材强度设计值。主梁拼装过程中最不利工况最大悬臂阶段的支架位移如图 9b 所示,支架最大位移 6mm,变形可控。

#### 3.3 施工过程中参数敏感性分析结果

本节就关键结构参数对施工过程中结构力学行为的影响进行参数敏感性分析,为施工过程中的误差修正及最优控制决策提供科学依据<sup>[19-20]</sup>,分析工况如表 3 所示。

##### 3.3.1 刚度变化对主梁线形影响分析结果

刚度变化对恒载作用下主梁线形影响如图 10 所示,主梁刚度变化在 2% 以内,主跨跨中挠度变化

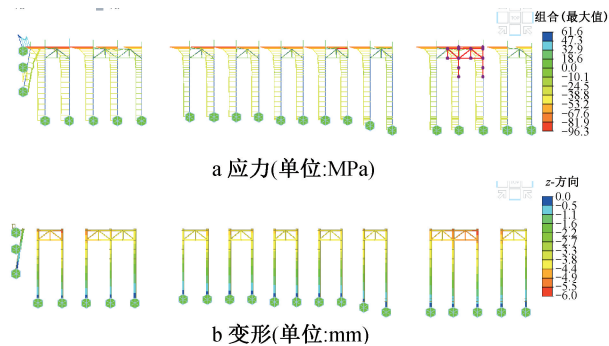


图 9 最大悬臂拼装阶段支架应力与变形

Fig. 9 Stress and deformation of the scaffolds in the maximum cantilever assembly stage

表 3 主桥敏感性分析计算工况

Table 3 Calculation conditions for sensitivity analysis of main bridge

参数	基准状态	变化		
		变化 1	变化 2	变化 3
主梁刚度/%	按设计值	±2	±5	±10
主梁自重/%	按设计值	±2	±5	±10
环境温度/℃	设计基准温度	±10	±20	上、下层 桥面温差 20

值在 2.4mm 以内,梁重每变化 2% 中跨跨中挠度变化约 2.4mm。

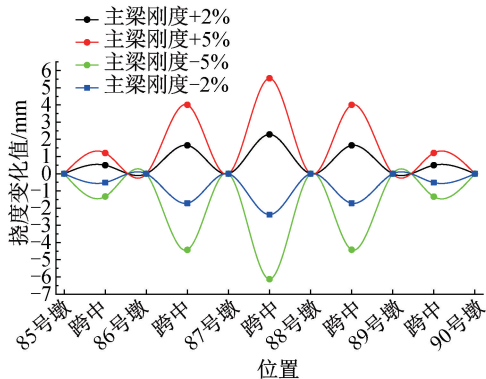


图 10 刚度变化对主梁线形影响

Fig. 10 The influence of the stiffness change on the alignment of the main girder

### 3.3.2 梁重变化对主梁线形影响分析结果

梁重变化对恒载作用下主梁线形影响如图 11 所示,主梁梁重变化在 2% 以内,主跨跨中挠度变化值在 1.0mm 以内,梁重每变化 5% 中跨跨中挠度变化约 3.4mm。

### 3.3.3 温度变化对主梁线形和内力影响分析结果

温度变化对主梁线形影响如图 12 所示,整体升、降温对主梁线形影响较小,上、下层桥面部位温差在 20℃ 时边跨跨中挠度变化 3.8mm。

温度变化引起的钢桁梁各临时墩支点处的纵向位移如图 13 所示,图中相对里程的零点设在 85

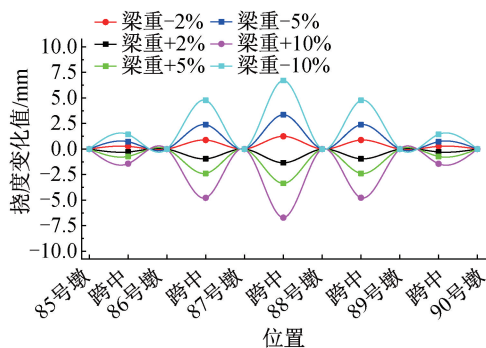


图 11 梁重变化对主梁线形影响

Fig. 11 The influence of girder weight change on the alignment of the main girder

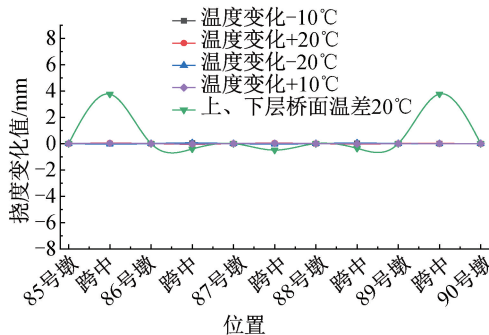


图 12 温度变化对主梁线形影响

Fig. 12 The influence of temperature change on the alignment of the main girder

号墩固定支座中心线处,可得出整体升、降温对主梁纵向位移影响较大,整体温度±10℃ 时距固定支点最远处梁端最大变化±58.1mm,整体温度±20℃ 时距固定支点最远处梁端最大变化±119.4mm,上、下层桥面温差 10℃ 时距固定支点最远处梁端最大变化 30mm,在中跨合龙前已安装完成梁段越长远离固定支点的梁段纵向位移越大。

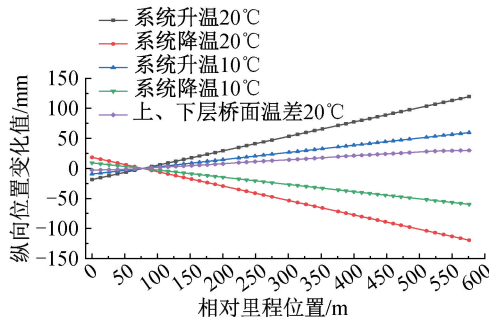


图 13 温度变化对钢桁梁各临时墩纵向位移影响

Fig. 13 The influence of temperature change on the longitudinal displacement of each temporary pier of steel truss girder

温度变化对主梁内力影响如图 14 所示,可看出整体升、降温对主梁内力影响较小,上、下层桥面部

位温差对主梁内力影响较大,温差 20℃ 边跨跨中弯矩最大变化-795.0kN·m。

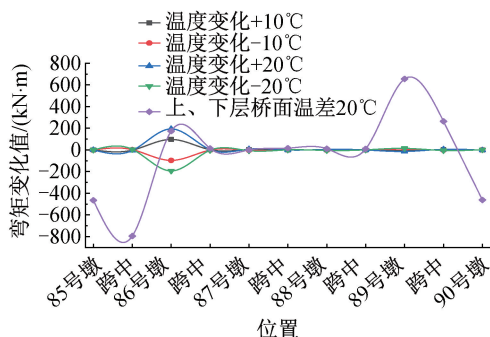


图 14 温度变化对主梁内力影响

Fig. 14 The influence of temperature change on the internal force of main girder

#### 4 结语

1) 公铁两用双层连续钢桁梁在支架原位拼装阶段主梁最大应力为 35.5MPa、支架最大应力为 61.6MPa,主梁最大变形为 7.6mm、支架最大变形为 6mm,主梁和支架应力、变形较小,易于钢桁梁安装精度控制。

2) 上层公路二期、下层铁路二期施工阶段的中跨竖向位移分别为-81.9,-117.5mm,二期恒载对主梁竖向变形影响较大,可通过上、下层公路二期的荷载-变形曲线对桥梁整体刚度进行修正来预测和控制无砟轨道安装高程。

3) 主梁刚度和自重误差在 2% 以内时,钢桁梁中跨跨中挠度变化 2.4,2.3mm,可将 2% 作为主梁刚度和自重施工误差极限值。

4) 环境整体升、降温对主梁应力和变形影响较小,上、下层桥面温差对主梁竖向变形和纵向变形影响较大,施工时需关注上、下层桥面间温差效应对主梁竖向和纵向变形的影响。

#### 参考文献:

[ 1 ] 朱志辉,任增震,郑纬奇,等.长联大跨钢桁梁桥-无砟轨道静动力适应性研究[J].铁道工程学报,2024,41(3):65-72.  
ZHU Z H,REN Z Z,ZHENG W Q,et al. Research on static and dynamic adaptability of ballastless tracks on multi-long-span steel truss bridge[J]. Journal of railway engineering society, 2024, 41(3):65-72.

[ 2 ] CHENG J,XU M S,XU H. Mechanical performance study and parametric analysis of three-tower four-span suspension bridges with steel truss girders[J]. Steel & composite structures, 2019, 32(2):189-198.

[ 3 ] 李有为,唐启,项梁.沪通长江大桥跨横港沙 112m 简支钢桁梁全悬臂架设安装技术[J].世界桥梁,2017,45(3):6-10.  
LI Y W,TANG Q,XIANG L. Full-cantilever erection techniques for 112m simply-supported steel truss girder crossing

Henggangsha of Hutong Changjiang River Bridge [ J ]. World bridges,2017,45(3):6-10.

- [ 4 ] YILMAZ M F,OZAKGUL K,CAGLAYAN B O. Modification of an existing steel truss railway bridge for installation of railway overhead electrification system [ J ]. Journal of performance of constructed facilities,2022,36(3):04022022.
- [ 5 ] 侯健,徐伟,彭振华.平曲线段大跨简支钢桁梁悬臂架设方法[J].世界桥梁,2018,46(5):46-49.  
HOU J,XU W,PENG Z H. Cantilever erection method for long-span simply-supported steel truss girder on plane curve section [ J ]. World bridges,2018,46(5):46-49.
- [ 6 ] 唐勇,陈涛.沪通长江大桥跨南岸大堤 112m 简支钢桁梁双悬臂架设技术[J].世界桥梁,2018,46(1):6-11.  
TANG Y,CHEN T. Two-side cantilever erection technique for three spans of 112m simply-supported steel truss girder of Hutong Changjiang River Bridge crossing south embankment [ J ]. World bridges,2018,46(1):6-11.
- [ 7 ] 华旭刚,曹利景,王钰,等.钢桁梁桥大悬臂状态顶推启动瞬态动力效应分析[J].桥梁建设,2019,49(4):18-22.  
HUA X G,CAO L J,WANG Y,et al. Transient dynamic effect analysis of incremental launching start-up of steel truss girder bridge under long cantilever state [ J ]. Bridge construction,2019,49(4):18-22.
- [ 8 ] 龙皓.浮运法在 80m 铁路钢桁梁架设中的应用[J].桥梁建设,2007,37(S1):58-61.  
LONG H. Application of floating method to erection of 80m span railway steel truss girder [ J ]. Bridge construction,2007,37(S1):58-61.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 王玲,王韬,王荣霞.大跨径连续钢桁梁桥悬臂拼装线形控制方法研究 [ J ]. 重庆交通大学学报 ( 自然科学版 ),2017,36(11):11-15.  
WANG L,WANG T,WANG R X. Linear control method of cantilever assembly of long span continuous steel truss bridge [ J ]. Journal of Chongqing Jiaotong University ( natural science ),2017,36(11):11-15.
- [ 11 ] 李兆峰,牛忠荣,方继,等.大型连续钢桁梁桥顶推施工中关键节点力学分析研究 [ J ]. 铁道学报,2021,43(4):158-165.  
LI Z F,NIU Z R,FANG J,et al. Mechanical analysis of key joints of super-spanned steel truss girder in incremental launching construction [ J ]. Journal of the China railway society,2021,43(4):158-165.
- [ 12 ] 田亮,赵健,李向海.三门峡黄河公铁两用桥钢桁梁顶推动力学分析 [ J ]. 铁道工程学报,2020,37(7):35-40.  
TIAN L,ZHAO J,LI X H. Dynamic analysis of incremental launching construction for steel truss girder in Sanmenxia Yellow River Rail-cum-road Bridge [ J ]. Journal of railway engineering society,2020,37(7):35-40.
- [ 13 ] 娄松,吴芳,江湧,等.大吨位钢桁梁步履式顶推滑移施工力学行为分析 [ J ]. 桥梁建设,2021,51(1):66-73.

- Water & wastewater engineering, 2014, 50(1):67-71.
- [12] 中国建筑标准设计研究院. 居住建筑卫生间同层排水系统安装:19S306[S]. 北京:中国计划出版社,2019.  
China Institute of Building Standard Design & Research. Installation of same-floor drainage systems for residential building bathrooms:19S306[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [13] 北京市保障性住房建设投资中心,北京和能人居科技有限公司. 图解装配式装修设计与施工[M]. 北京:化学工业出版社,2019.  
Beijing Affordable Housing Construction Investment Center, Beijing Heneng Human Settlements Technology Co., Ltd. Illustrated design and construction of prefabricated decoration [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.
- [14] 张文祥. 装配式住宅厨卫模块集成设计研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2018.  
ZHANG W X. Research on integrated design of kitchen and bathroom modules in prefabricated residences [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2018.
- [15] 中国建筑标准设计研究院. 住宅厨房:14J913-2[S]. 北京:中国计划出版社,2014.  
China Institute of Building Standard Design & Research. Residential kitchens: 14J913-2 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [16] 刘宁. 普通高层住宅厨房集中排烟道计算机模拟研究[J]. 制冷与空调(四川), 2009, 23(5):119-126.  
LIU N. Ordinary high-rise residential kitchen computer simulation in central exhaust system [J]. Refrigeration & air condition, 2009, 23(5):119-126.
- [17] 余丹阳,李永波,韩君庆,等. 混合式住宅厨房排烟系统设计方法的研究[C]//2021年中国家用电器技术大会论文集, 2021.  
YU D Y, LI Y B, HAN J Q, et al. Research on design methods of hybrid residential kitchen smoke exhaust systems [C]// Proceedings of 2021 China Household Electrical Appliances Technology Conference, 2021.
- [18] 周敏,胡文硕,高峰,等. 住宅厨房健康风险与用户体验问卷调查研究[J]. 住区, 2022(1):142-147.  
ZHOU M, HU W S, GAO F, et al. The questionnaire study of residential kitchen health risk and user experience [J]. Design community, 2022(1):142-147.
- [19] 樊越胜,彭杉杉,王欢. 住宅换气次数与污染物浓度的研究[J]. 建筑热能通风空调, 2019, 38(8):41-43.  
FAN Y S, PENG S S, WANG H. The relationship between air exchange rate and indoor formaldehyde and TVOC concentration in natural ventilation residential [J]. Building energy & environment, 2019, 38(8):41-43.
- [20] 赵雨,谭洪卫. 上海地区不同通风方式住宅的室内环境实测分析[J]. 建筑热能通风空调, 2019, 38(1):28-33.  
ZHAO Y, TAN H W. Study on residential PM2.5 pollution status quo and the relationship between indoor and outdoor [J]. Building energy & environment, 2019, 38(1):28-33.
- [21] 周佳佳,徐宝萍. 基于室内空气质量和节能的通风策略研究[J]. 建筑热能通风空调, 2019, 38(12):27-32.  
ZHOU J J, XU B P. Study on ventilation strategies based on integrated analysis of indoor air quality and energy saving [J]. Building energy & environment, 2019, 38(12):27-32.
- [22] 周超斌. 自然通风对高层住宅空气品质影响的研究[D]. 天津:天津大学,2016.  
ZHOU C B. Impact of natural ventilation on indoor air quality in high-rise apartments [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.

## (上接第45页)

- LOU S, WU F, JIANG Y, et al. Mechanical analysis of walking-type incremental launching and sliding construction of large-tonnage steel truss girder [J]. Bridge construction, 2021, 51(1):66-73.
- [14] 赵汗青,任为东,高静青,等. 长联大跨连续钢桁梁悬臂拼装全过程仿真研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(11):6-11.  
ZHAO H Q, REN W D, GAO J Q, et al. Simulation research on the whole process of cantilever erection of long-connected large-span continuous steel truss girders [J]. Railway standard design, 2021, 65(11):6-11.
- [15] 赵汗青,金令,任为东,等. 长联大跨连续钢桁梁架设方案及关键临时结构分析研究[J]. 铁道勘察, 2023, 49(3):102-109.  
ZHAO H Q, JIN L, REN W D, et al. Analysis and research on erection scheme and key temporary structures of long-span continuous steel truss girder [J]. Railway investigation and surveying, 2023, 49(3):102-109.
- [16] 何源,赵如,许乐,等. 钢桁梁施工线形控制方案量化评价指标[J]. 铁道建筑, 2023, 63(12):92-96.  
HE Y, ZHAO R, XU L, et al. Quantitative evaluation indicators of construction alignment control scheme for steel truss girder [J]. Railway engineering, 2023, 63(12):92-96.
- [17] 姜贺,牛伟锋,韩胜利,等. 济阳黄河公铁两用特大桥梁施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2024, 52(1):45-50.  
JIANG H, NIU W F, HAN S L, et al. Key construction techniques of Jiyang Huanghe River Rail-cum-road Bridge [J]. World bridges, 2024, 52(1):45-50.
- [18] 陈淮,李杰,李谊修. 连续钢桁梁施工阶段整体节点局部应力分析[J]. 桥梁建设, 2011, 41(5):21-25, 58.  
CHEN H, LI J, LI Y X. Local stress analysis of integral joint of continuous steel truss girder at construction stage [J]. Bridge construction, 2011, 41(5):21-25, 58.
- [19] 梁玉雄,肖健. 施工误差对混凝土自锚式悬索桥成桥线形影响研究[J]. 施工技术, 2021, 50(11):41-45.  
LIANG Y X, XIAO J. Influence analysis of construction error for the completed line shape of concrete self-anchored suspension bridge [J]. Construction technology, 2021, 50(11):41-45.
- [20] WANG S R, FENG J, YANG L G, et al. Harnessing the joint effect of approach bridges in arch bridge construction: an analytical study on thrust stiffness and elevation error mitigation [J]. Frontiers in materials, 2024, 10:1321177.