

斜拉桥宽幅钢-UHPC组合梁悬拼匹配分析

陈常松,王聪*,黄萸

(长沙理工大学土木与环境工程学院,湖南长沙 410114)

摘要:为控制斜拉桥宽幅钢-UHPC组合梁悬臂拼装时待装与已装梁段间的变形差,实现精准匹配,该文首先介绍了提前挂索并结合吊机卸载的匹配方法;然后以超千米级宽幅钢-UHPC组合梁斜拉桥——观音寺长江大桥为工程背景,建立了局部精细化有限元模型,分析了宽幅钢-UHPC组合梁悬臂拼装施工阶段匹配截面竖向变形规律;最后探讨了匹配顺序、预挂索力和吊机卸载比等因素对梁段变形和受力的影响,提出了预张索力及卸载比计算方法,确定了最优卸载方案。研究表明:采用提前挂索吊机卸载法可有效减小宽幅钢-UHPC组合梁悬臂拼装时待装与已装梁段间的竖向变形差,为待装与已装梁段的拼接创造较好的精确匹配条件。

关键词:斜拉桥;宽幅钢-UHPC组合梁;悬臂拼装;精确匹配;有限元分析

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

Matching Analysis of Cantilever Assembly for Wide Steel-UHPC Composite Girder in Cable-Stayed Bridge

CHEN Changsong, WANG Cong*, HUANG Gen

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: To control the deformation difference between the to-be-installed and installed segments during the cantilever assembly of wide steel-UHPC composite girders in cable-stayed bridges and achieve precise matching, this paper first introduced a matching method combining pre-hanging cables with crane unloading. Then, by taking the Guanyin Temple Yangtze River Bridge (a super-kilometer-span cable-stayed bridge with wide steel-UHPC composite girders) as the engineering background, a locally refined finite element model was established to analyze the vertical deformation laws of the matching sections during the cantilever assembly construction phase. Finally, the effects of matching sequence, pre-hanging cable force, and crane unloading ratio on the deformation and stress of the girder segments were discussed. Calculation methods for pre-tensioning cable force and unloading ratio were proposed, and the optimal unloading scheme was determined. The results show that the method of pre-hanging cables with crane unloading can effectively reduce the vertical deformation difference between the to-be-installed and installed segments during the cantilever assembly of wide steel-UHPC composite girders, creating favorable conditions for the precise matching of the splicing between to-be-installed and installed segments.

Keywords: cable-stayed bridge; wide steel-UHPC composite girder; cantilever assembly; precise matching; finite element analysis

0 引言

随着斜拉桥跨度和主梁宽度增加,其主梁在悬拼施工过程中的架设难度也逐渐增大。斜拉桥主梁悬拼施工过程中,待装梁段与已装梁段之间的受力状态

不同,导致待装梁段和已装梁段相邻匹配截面产生较大的变形差,这一现象在宽幅主梁匹配时更为突出^[1]。在悬拼匹配过程中,钢-UHPC组合梁的超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)桥面板已与槽形钢梁提前结合,与钢箱梁相比,具有起吊

收稿日期:2024-05-06 修回日期:2024-10-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278143)

作者简介:陈常松,男,博士,教授.E-mail:1343471153@qq.com

*通信作者:王聪,男,硕士研究生.E-mail:357250130@qq.com

重量更大、主梁刚度在匹配截面的工地湿接缝处有突变以及结构变形更复杂的特点,若采用常规的强制匹配措施可能会较严重地影响主梁的受力和变形。因此,有必要对斜拉桥宽幅钢-UHPC组合梁整体吊装匹配过程中的变形和匹配措施进行深入研究,提出有效且实用的分析和匹配方法,以指导实际施工。

在斜拉桥宽幅主梁悬拼研究方面,中国学者研究了梁段自重、起吊重量、温度梯度、桥面吊机位置、梁段刚度以及横纵隔板刚度等因素对主梁横向变形的影响^[2-7]。国外学者从构件尺寸、起重机选型、配重、安装半径、起重臂长度、起重物安全等方面,探讨其对主梁的悬拼和匹配的影响^[8]。国内外学者对主梁悬拼过程中的受力和变形规律已有较完整系统的认识。研究与工程实践表明,常见的斜拉桥主梁悬拼匹配方法有两种:①强制匹配法。通过临时匹配件焊接定位、码板临时固定、楔形块、T形架或千斤顶调平等辅助措施进行强制匹配。该方法通过强迫施加外力调整错边量,易在焊缝处产生较大的附加剪切应力,甚至造成撕裂焊缝^[5,9-11];②匹配顺序法。优先匹配刚度较大的边腹板(或中腹板),再调整中腹板(边腹板)处相对变形,最后按一定间距逐步调整残余高差,直至全截面匹配完成^[12]。该方法施加强迫外力强制主梁腹板复位,在主梁内部产生较大局部次内力^[13]。对于千米级组合梁斜拉桥,其主梁悬拼过程中对主梁受力和变形控制要求非常严格,上述两种方法均不能完全适用,需要进一步寻找适用于大跨度斜拉桥宽幅钢-UHPC组合梁的匹配方法。

焊接边腹板、提前挂索和吊机卸载相结合的匹配方法是一种能够消除千米级斜拉桥宽幅组合梁悬拼过程中相邻主梁匹配变形差问题的有效途径^[14]。该方法通过焊接刚度较大的边腹板,提前挂设待装梁段斜拉索,并以吊机卸力方式来减小不匹配变形,具有施工效率高、避免因吊机卸载引起的斜拉索锚固区桥面板开裂、改善边腹板焊缝的受力状态和减小匹配截面的相对变形等优点^[9-10,15-17]。然而,现有研究中并未系统研究预挂索力与卸载比的合理取值,对分级卸载变形的分析也不够全面,且研究对象多为跨度不足800 m、宽度小于40 m的桥梁。为此,本文以主梁宽度达41 m的超千米级宽幅钢-UHPC组合梁斜拉桥为背景,对其悬臂拼装变形分析与控制展开研究。首先,基于提前挂索与吊机卸载匹配法,完善并优化卸载匹配方案;然后,建立局部精细化有限元模型,系统分析悬臂拼装过程中主梁的横

向变形规律;最后,对比评估不同悬拼匹配措施的实施效果,对提前挂索吊机卸载匹配方法的卸载方案进行多工况分析,确定最优卸载方案。

1 悬拼匹配方法

为优化斜拉桥宽幅钢-UHPC组合梁在悬臂拼装时匹配截面的受力状态,减小待装与已装梁段变形差异,并解决因强制匹配在焊缝处产生较大局部次内力的问题,本文基于提前挂索吊机卸载法,完善并优化了预张索力及吊机卸载比的两种计算方法。

1.1 提前挂索吊机卸载法原理

提前挂索吊机卸载法的主要步骤如下:在梁段悬臂吊装到位后,先匹配并焊接边腹板,并在桥面吊机松钩前,预先安装斜拉索并张拉适当索力,随后进行吊机卸载,达到匹配要求后,最后焊接匹配截面其余位置,完成宽幅主梁悬臂拼装的匹配工序。其示意图如图1(a)所示。提前挂索卸载匹配法的原理为:通过提前挂设的斜拉索($i+1$ 号斜拉索)的竖向分力 T_V 来平衡待装梁段(i 号梁段)部分自重,同时,按比例卸载桥面吊机的提升力,使待装与已装梁段受力状态相近。待装梁段边腹板焊缝承受部分自重,待装梁段上拱变形转变为下挠;同时,已装梁段因吊机卸载承受的吊机前后支点总反力减小,已装梁段下挠变形随之减小,从而有效减小待装与已装梁段之间的匹配变形差。提前挂索吊机卸载法的受力图如图1(b)所示。

1.2 预张索力及卸载比的计算方法

该方法的关键在于合理确定提前挂设斜拉索的预张索力以及桥面吊机的卸载比,达到改善边腹板焊缝受力、优化锚固区桥面板受力状态和减小匹配截面的相对变形等效果。为此,本文对以下两种预张索力及卸载比的计算方法进行完善并优化。

(1) 调整卸载比确定预张索力

此方法通过分级调整卸载比 η (卸载力 S 与待装梁段自重 G 的比值)来计算卸载力 S (数值上等于卸载比 η 与待装梁段自重 G 的乘积,理论上等于梁段所受的自重与临时吊点提升力的合力)。然后根据提前挂入 $i+1$ 号拉索的竖向分力 T_V ,在边腹板拼接焊缝处(或斜拉索锚固截面)产生的正弯矩,来平衡因桥面吊机松钩而产生的卸载力 S 对边腹板拼接焊缝处(或斜拉索锚固截面)产生的负弯矩,进而确定拉索的预张索力。提前挂索吊机卸载匹配法计算受力简图如图1(b)所示,计算公式如式(1)~(4)所示:

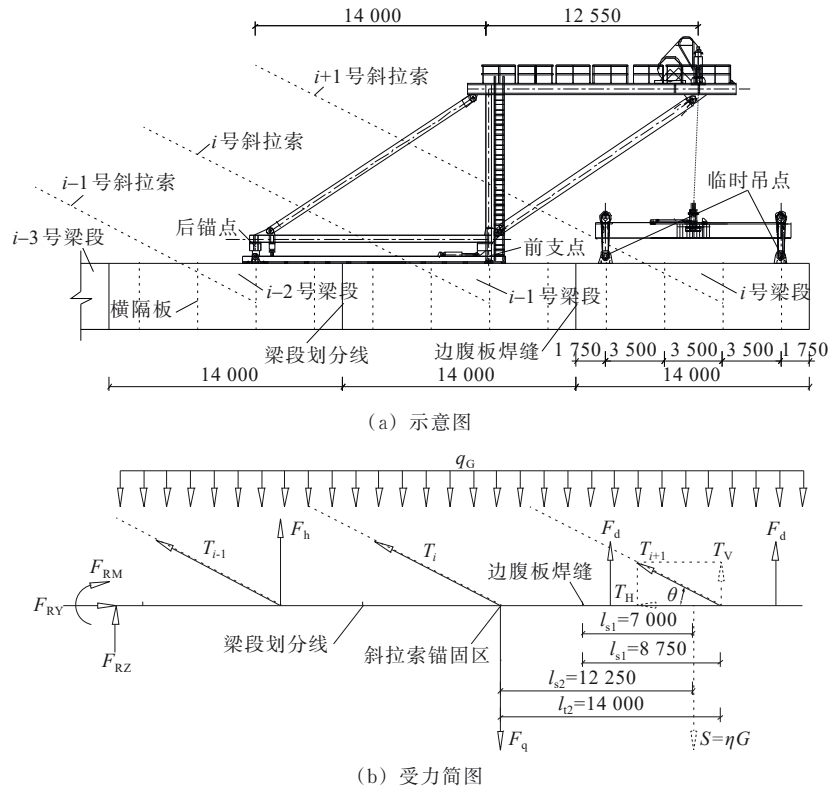


图1 提前挂索吊机卸载匹配法(单位:mm)

Figure 1 Matching method of pre-hanging cable and crane unloading (unit: mm)

$$S = \eta G = G + \sum F_d \quad (1)$$

$$S l_{s_i} + T_v l_{t_i} = 0 \quad (2)$$

$$T_v = T_{i+1} \sin \theta \quad (3)$$

$$\sum F_d + \sum F_s + \sum T_v + G = 0 \quad (4)$$

图1及式(1)~(4)中: l_{s_i} 为待装梁段(i 号梁段)重心到已装梁段($i-1$ 号梁段)边腹板焊缝处(l_{s_1})或拉索锚固截面(l_{s_2})的水平距离(m); l_{t_i} 为预挂斜拉索($i+1$ 号斜拉索)锚固截面到已装梁段边腹板焊缝处(l_{t_1})或拉索锚固截面(l_{t_2})的水平距离(m); T_{i+1} 和 T_v 分别为桥面吊机卸载后预挂斜拉索的索力与竖向分力(kN); F_q 、 F_h 、 F_d 和 F_s 分别为前、后支点作用力、临时吊点提升力,以及边腹板竖向剪力(kN); θ 为预挂斜拉索与水平方向的夹角($^\circ$)。

(2) 拟定预张索力调整卸载比

在实际吊机卸载过程中,预挂斜拉索的索力随之增大。为使卸载后的最终索力等于理论索力,需进行较为烦琐的迭代计算和曲线拟合。且预张索力通常小于一张索力,其数值无法达到由拟定卸载比计算出的最优预张索力。因此,计算预张索力和卸载比的方法可优化为,优先拟定多组接近一张索力的合理预挂斜拉索索力作为荷载边界,卸载比从0%到100%范围内分级调整,通过工况分析对比,计算

出在拟定合理预挂索力下所对应的最优卸载比。

2 悬臂拼装竖向变形影响分析

在斜拉桥悬臂拼装过程中,待装与已装梁段受力状态不同,其梁段匹配截面产生相对变形差,出现临时匹配困难问题。为解决该问题,本文依托实际工程,建立了精细化有限元模型,分析匹配截面的横向变形规律。

2.1 分析模型

(1) 依托工程概况

观音寺长江大桥是一座超千米级混合式组合梁斜拉桥^[18]。主桥跨径布置为(62+64+2×72+80+1160+96+72+2×64+54)m=1860m,中跨两侧为401m钢-UHPC组合梁(UHPC平板+槽形钢梁组合结构),中跨跨中为304m钢箱梁(UHPC桥面铺装+钢箱梁),边跨为377m混凝土箱梁。桥型布置如图2所示。

钢-UHPC组合梁采用单箱三室流线形箱形断面,全宽41m(含风嘴),桥梁中心线处梁高4m,桥面板设双向2.0%横坡,标准节段长14m,梁段内设置4道实腹式横隔板,间距3.5m,UHPC桥面板宽34.5m。主梁标准横断面如图3所示。

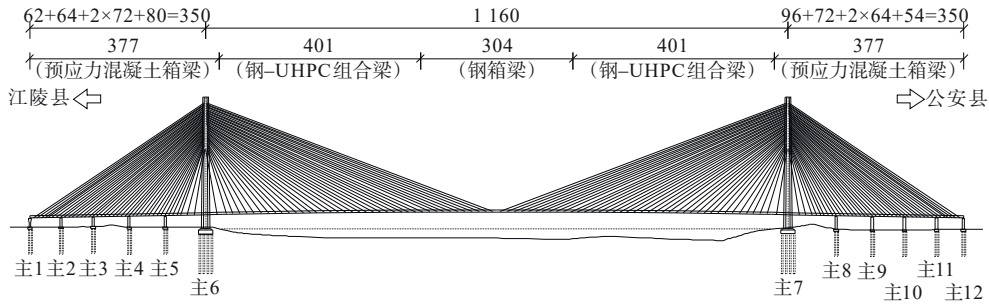


图2 观音寺长江大桥桥型布置图(单位:m)

Figure 2 Layout of Guanyin Temple Yangtze River Bridge (unit: m)

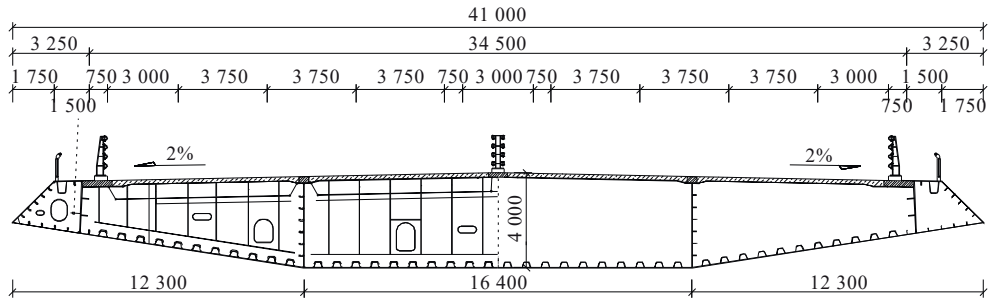


图3 钢-UHPC组合梁标准横断面图(单位:mm)

Figure 3 Standard cross-section of steel-UHPC composite girder (unit: mm)

(2) 有限元模型

为研究观音寺长江大桥钢-UHPC组合梁节段在悬臂拼装施工过程中匹配截面的相对变形,本文采用

Abaqus软件建立局部精细化混合单元有限元模型。整体网格尺寸不超过200 mm,并对局部网格进行适当加密处理。单元类型及材料参数如表1所示。

表1 单元类型及材料参数

Table 1 Element types and material parameters

结构	单元类型	单元名称	单元数量/个	材料	弹性模量/MPa	泊松比
UHPC桥面板	实体单元	C3D8R	10 904	UHPC-U160	46 200	0.2
钢梁主体结构	板壳单元	S4R	96 234	Q370QD	206 000	0.3
斜拉索	弹簧单元	Spring	8	锌铝合金	201 000	—
桥面吊机	桁架单元	T3D2	46	—	—	—

在槽形钢梁斜拉索的锚点位置施加施工索力,并采用沿斜拉索的单向Spring接地弹簧模拟斜拉索;将钢-UHPC组合梁节段模型近塔端耦合于一个固结参考点,以模拟近塔端约束,同时忽略梁段的整体变形对匹配截面的影响。根据圣维南原理,为减小固结边界对悬臂端梁段变形及受力的影响,选取5个梁段进行建模分析,包括4个已装梁段和1个待装梁段;不考虑桥面板和钢梁之间的滑移行为,采用“Tie”约束将其连接;忽略桥面吊机的变形,为吊机添加刚体约束,桥面吊机与钢梁前后支点采用“PMC约束”;在建模过程中,为偏于安全,未考虑UHPC桥面板中的配筋,且暂不考虑风嘴等次要结构^[19];鉴于钢箱梁的吊装和匹配多在夜间进行,此时温差变化较小,忽略温度梯度对变形的影响^[6]。悬臂拼装示意图及有

限元模型如图4、5所示。

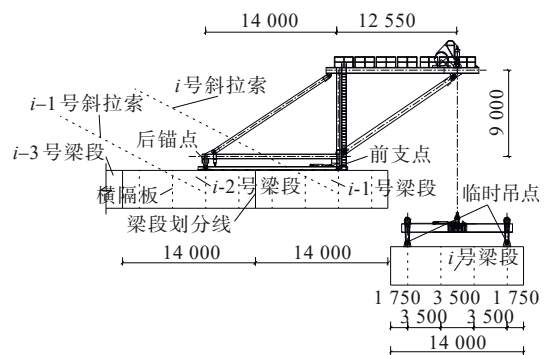


图4 悬臂拼装示意图(单位:mm)

Figure 4 Schematic diagram of cantilever assembly (unit: mm)

2.2 悬臂吊装分析

在悬臂阶段,已装梁段主梁承受自重荷载和斜

拉索索力作用;在吊装前,吊机(自重约 100 t)安置于已装梁段,其重心距离前支点约 1.922 m,前、后支点总作用力分别约为-914.4 kN 和-85.6 kN;吊装过程中,待装梁段主要承受梁段自重(起吊重量约 500 t)和临时吊点的提升力;已装梁段主要承受梁段自重、斜拉索拉力、吊机自重以及由待装梁段起吊重量引起吊机前后支点的反力,起吊过程中,前支点总承载力约为-5 655.47 kN,后支点总锚力约为 2 155.47 kN,这些支点反力均以等效节点荷载的形式施加于前、后支点对应的横隔板加劲锚固区域。已装与待装梁段变形云图如图 6 所示。

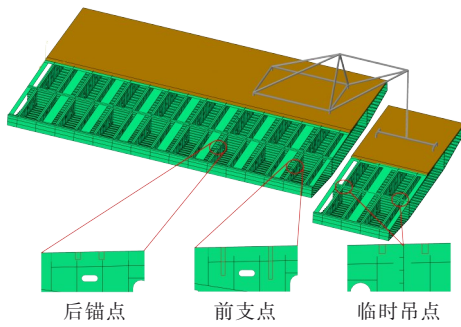
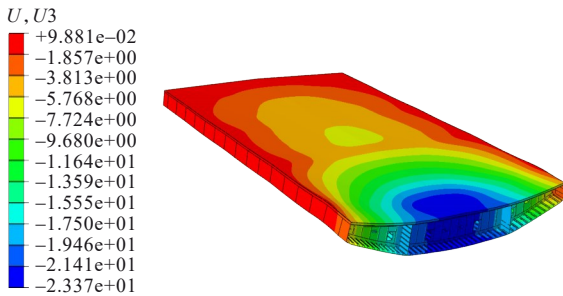
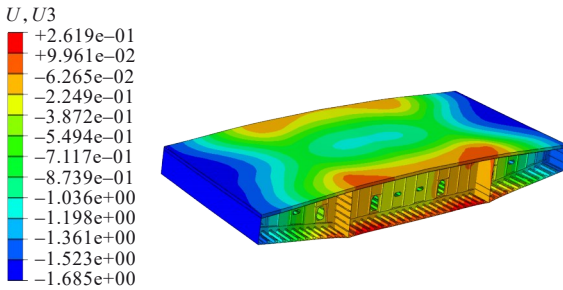


图 5 悬臂拼装有限元模型

Figure 5 Finite element model of cantilever assembly



(a) 已装梁段



(b) 待装梁段

图 6 已装与待装梁段变形云图(单位:mm)

Figure 6 Deformation of installed and to-be-installed girder segments (unit: mm)

2.3 匹配截面变形影响分析

为研究待装梁段与已装梁段匹配截面的竖向变

形特性并排除整体变形影响,本文将单侧匹配横截面上各点相对于边腹板顶点的竖向变形值定义为“相对竖向变形值”;同时,将待装与已装梁段匹配截面对应点之间的变形差定义为“匹配变形差”。基于此,从悬臂阶段到主梁吊装前后,待装与已装梁段匹配截面顶板和底板的相对竖向变形值如图 7 所示。

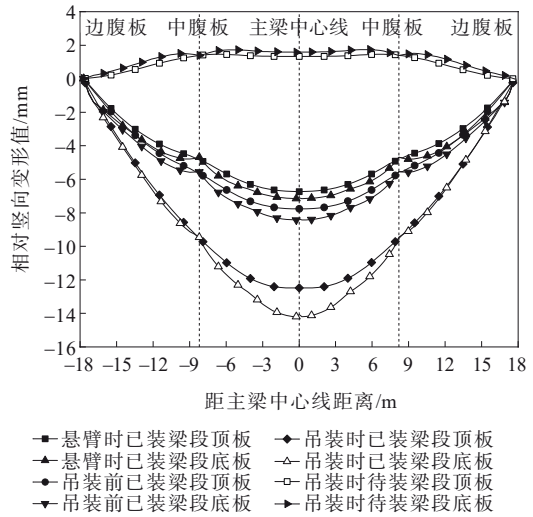


图 7 匹配截面相对竖向变形值

Figure 7 Relative vertical deformation values of matching sections

由图 7 可知:① 已装梁段在桥面吊机前后支点受力的影响下,横截面中部产生下挠变形;而待装梁段截面在吊点的提升力和自身重力的作用下,横截面中部呈现上拱变形。已装与待装梁段受力不同,且变形方向相反,在匹配截面产生匹配变形差,造成拼装匹配困难;② 从悬臂阶段到吊装前,已装梁段桥面吊机自重使截面最大相对竖向变形值由 7.05 mm 增长到 8.42 mm;吊装时待装梁段起吊重量导致截面最大相对竖向变形值增至 14.20 mm。这表明待装梁段起吊重量引起的吊机前、后支点力是导致已装梁段匹配截面产生中部下挠的主要因素;待装梁段截面相对竖向变形幅值较小;③ 待装与已装梁段的顶板和底板最大不匹配变形差分别为 13.82 mm 和 15.65 mm。其中,底板相对竖向变形更大且错边量也更大,用于分析梁段匹配时底板相比于顶板匹配变形差也更为敏感。

3 悬臂拼装匹配措施

参考现有匹配方法,分析其对调整钢-UHPC 组合梁匹配截面匹配变形差的适用效果,选择截面匹配变形差最小、结构受力安全、施工工序简便的最优

匹配方法。强制匹配法通过施加外力的方式将主梁匹配截面强制匹配,易在焊缝处产生较大的附加剪切应力,甚至造成撕裂焊缝。这与超大跨度斜拉桥对施工应力与变形需严格控制的要求相悖,故不予采用。因此,本文对比分析匹配顺序法和提前挂索吊机卸载匹配法两种方案的实施效果。

3.1 匹配顺序法

采用匹配顺序法进行悬臂拼接时,优先对齐并匹配刚度较大的边腹板或中腹板,然后进行剩余截面的匹配焊接。中腹板优先匹配和边腹板优先匹配两种匹配顺序下,匹配截面 Mises 组合应力及底板相对变形值如图 8 所示。

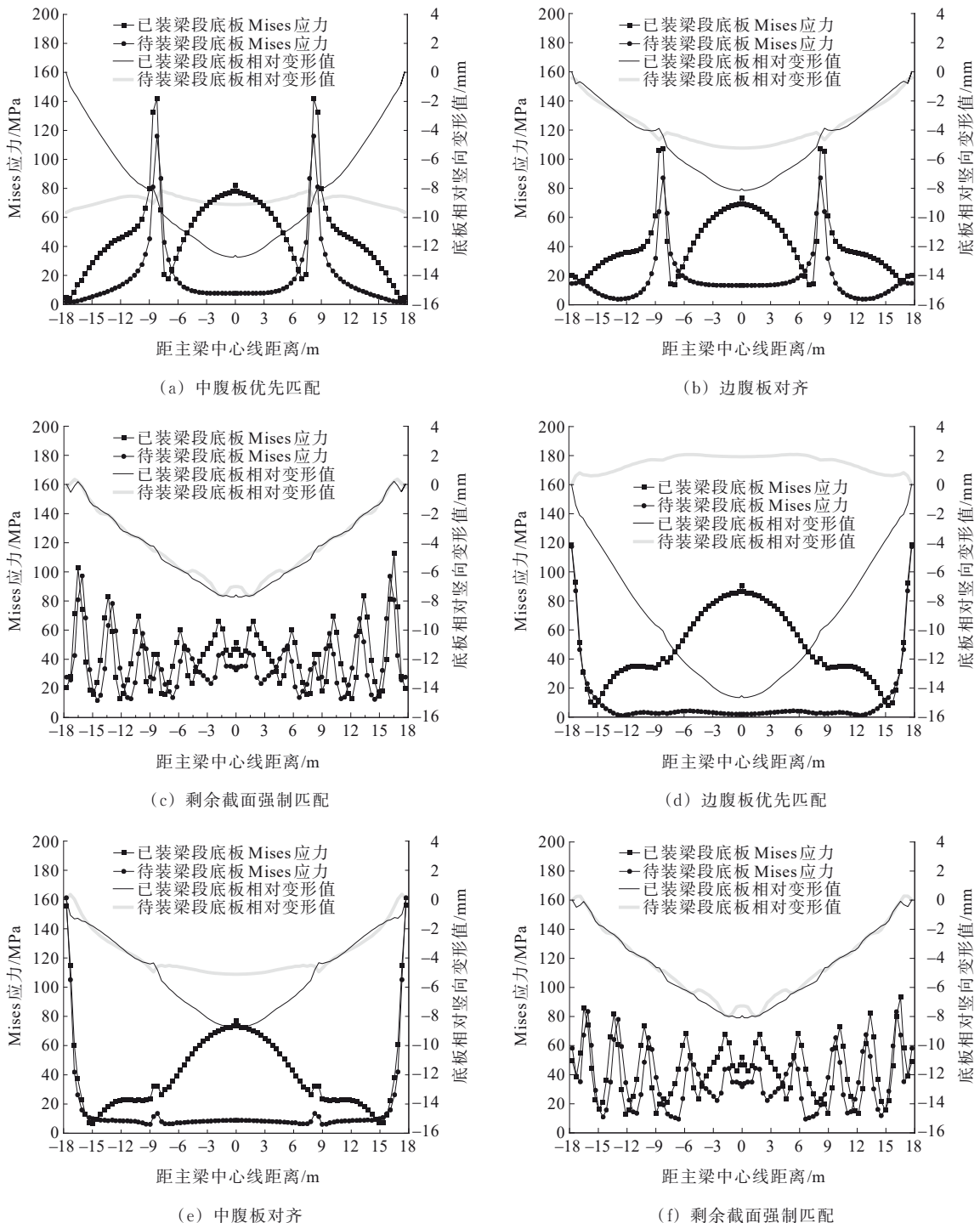


图 8 匹配截面 Mises 应力及底板相对变形值

Figure 8 Mises stress of matching section and relative deformation value of bottom plate

由图8可知:①在中腹板优先匹配时[图8(a)~(c)],边腹板和桥梁中心线错边量分别为9.66 mm和5.21 mm。后续边腹板对齐和剩余截面强制匹配工序时待装和已装梁段底板变形不协调,匹配截面应力变化剧烈且变化幅值较大,底板最大Mises应力为112.55 MPa,出现在距边腹板最近的底板临时匹配件处;②在边腹板优先匹配时[图8(d)~(f)],中腹板和桥梁中心线错边量分别为11.75 mm和16.58 mm,强制剩余截面匹配底板最大Mises应力为93.34 MPa,同样出现在距边腹板最近的底板临时匹配件处。

综上,在两种匹配顺序下,梁段均存在较大相对变形值,全截面强制匹配焊接虽然可满足焊接要求,但在匹配截面附近变形不协调产生较大的局部次内力^[13]。此外,槽形钢梁顶板(预留钢板)同时作为桥面板的预制底模,如施加过大外力强制匹配,可能影响桥面板性能并导致原始缺陷的产生。相比之下,由于边腹板的设计截面厚度大于中腹板,在悬臂匹配时优先匹配边腹板是最优选择。该方法先固定截面厚度较大的边腹板,让其作为连接待装与已装梁段的支撑并参与结构受力,然后采取一定的措施逐步消除剩余截面错台。其匹配难度低于中腹板优先匹配方案,更能确保梁段悬臂匹配的合理连接。

3.2 提前挂索吊机卸载匹配法

为了明确提前挂索吊机卸载匹配法对匹配变形差调整效果,并对比确定预张索力及卸载比的两种计算方法,本文设置了6个工况进行对比分析。工况1作为不挂设斜拉索的对照组,工况2和3基于调整卸载比确定预张索力,工况4、5、6基于拟定预张索力

调整卸载比。最终拟合最优卸载方案,确定合理预张索力和最佳卸载比。

3.2.1 匹配工况对比

6种工况设置如下:工况1(参考文献[6]):边腹板对齐施焊,桥面吊机按比例卸载(不提前挂索);工况2(参考文献[16]):以改善边腹板焊缝受力为目标,采取提前挂入的*i*+1号拉索的竖向分力 T_v 与卸载力*S*对边腹板焊缝弯矩增量之和为零,吊机按比例卸载求得与之对应的斜拉索预张力;工况3(参考文献[15]):以改善锚固区桥面板受力为目标,采取提前挂入的*i*+1号拉索的竖向分力 T_v 与卸载力*S*对*i*号索梁锚固截面弯矩增量为零的控制条件,吊机按比例卸载求得与之对应的斜拉索预张力;工况4、5、6则分别拟定3组预挂斜拉索索力 $T_{i+1}^4=1\ 200\ \text{kN}$ 、 $T_{i+1}^5=2\ 500\ \text{kN}$ 和 $T_{i+1}^6=3\ 500\ \text{kN}$,再按比例分级调整卸载比。其中, T_{i+1}^n 和 T_v^n 表示工况*n*时预挂斜拉索力和索力竖向分力取值。

3.2.2 分析对象与荷载

根据钢-UHPC组合梁标准节段的布置,选取悬臂拼装“24号梁段”与提前挂设“NM25”号斜拉索,对边腹板焊缝受力及截面匹配变形差进行分析。将匹配阶段的吊机自重和待装梁段的吊装重量引起的吊机前后支点的反力,以等效节点荷载形式作用于前、后支点对应的横隔板锚固区域。等效节点荷载及索力竖向分力具体数据如表2所示。

3.2.3 卸载工况分析结果

各工况下,待装与已装梁段匹配截面底板对应点之间的匹配变形差如图9所示。

表2 等效节点荷载数据

Table 2 Equivalent node load data

卸载比 $\eta/\%$	后锚点反力 F_p/kN	前支点反力 F_q/kN	吊点提升力 F_d/kN	$T_{i+1}^1/$ kN	T_{i+1}^2/kN	T_{i+1}^3/kN	$T_{i+1}^4/$ kN	$T_{i+1}^5/$ kN	$T_{i+1}^6/$ kN
0	1 077.74	-2 827.74	1 250	0	0.00	0.00	1 200	2 500	3 500
10	965.68	-2 590.68	1 125	0	462.55	505.92	1 200	2 500	3 500
20	853.63	-2 353.63	1 000	0	925.10	1 011.83	1 200	2 500	3 500
30	741.58	-2 116.58	875	0	1 387.65	1 517.75	1 200	2 500	3 500
40	629.52	-1 879.52	750	0	1 850.20	2 023.66	1 200	2 500	3 500
50	517.47	-1 642.47	625	0	2 312.75	2 529.58	1 200	2 500	3 500
60	405.41	-1 405.41	500	0	2 775.31	3 035.49	1 200	2 500	3 500
70	293.36	-1 168.36	375	0	3 237.86	3 541.41	1 200	2 500	3 500
80	181.31	-931.31	250	0	3 700.41	4 047.32	1 200	2 500	3 500
90	69.25	-694.25	125	0	4 162.96	4 553.24	1 200	2 500	3 500
100	-42.80	-457.20	0	0	4 625.51	5 059.15	1 200	2 500	3 500

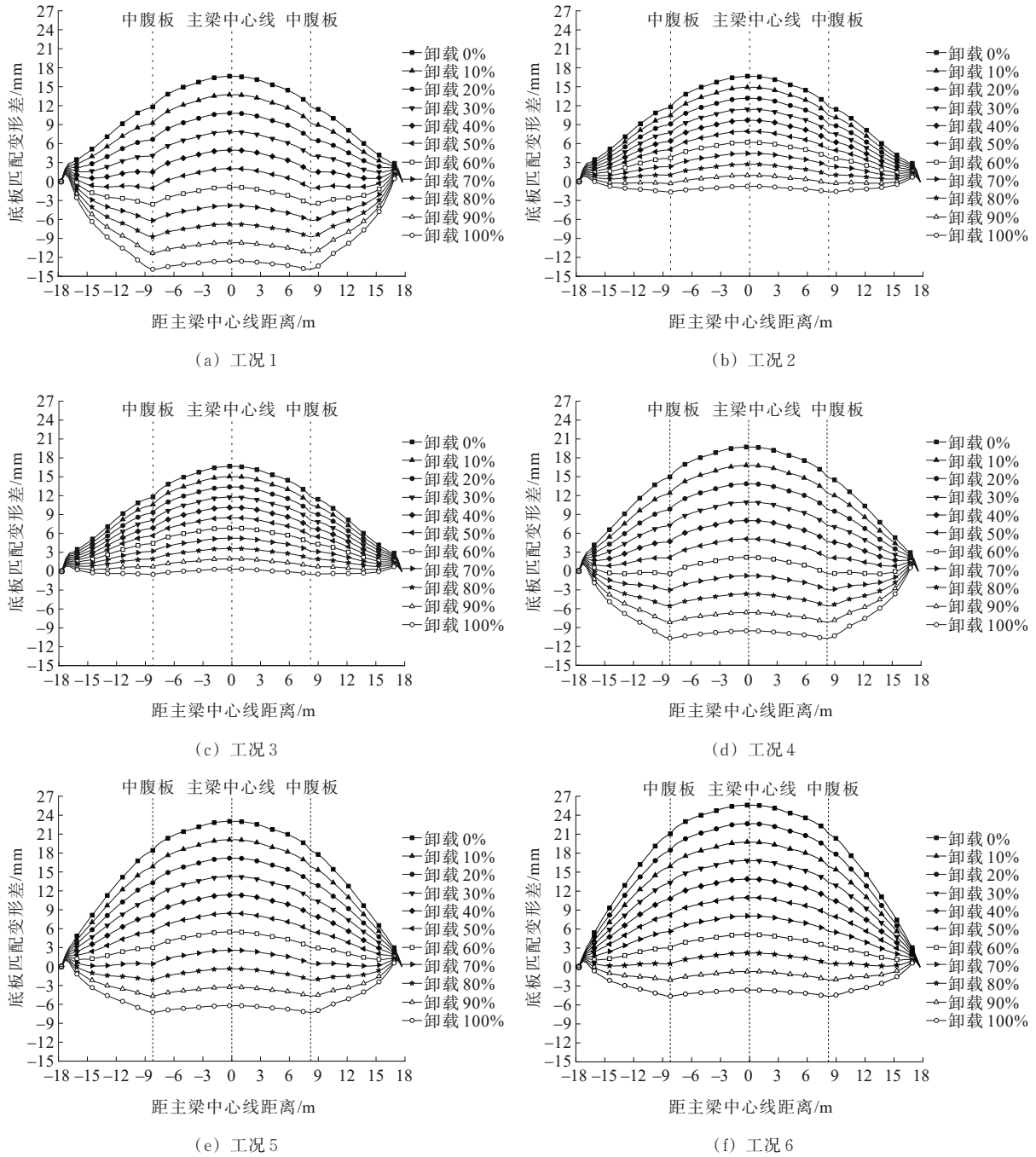


图9 底板匹配变形差

Figure 9 Matching deformation difference of bottom plate

由图9可知:

(1) 由焊接边腹板吊机卸载方案(不提前挂设斜拉索),即工况1分析结果可知:不匹配变形差随着卸载比增大呈先减小后增大的趋势,最优卸载比约为50%。但该卸载比下,边腹板焊缝位置Mises应力高达375.9 MPa(表3),已超过钢梁材料Q370qD的屈服强度安全限值(370 MPa)。这表明,通过边腹板匹配后吊机卸载使待装与已装梁段的变形趋势相同,

但不挂设斜拉索进行大幅吊机卸载会导致边腹板承受较大应力,对结构受力与施工安全不利。

(2) 提前挂设斜拉索吊机卸载方案的两种优化目标,即以改善边腹板焊缝受力为目标(工况2)和以改善桥面板受力为目标(工况3),分析结果可知:两种优化目标结果相近,最优卸载比分别为90%和100%,且边腹板焊缝处和锚固截面混凝土受力均在安全范围内。此时斜拉索索力分别达到4 162.96 kN

表3 工况1边腹板应力

Table 3 Stresses in side webs for Case 1

卸载比/ %	Mises 应力/ MPa	最大拉应力/ MPa	最大压应力/ MPa
0	43.6	18.7	24.1
10	74.4	49.5	68.6
20	141.0	119.3	127.9
30	219.2	189.2	187.8
40	297.5	259.0	248.5
50	375.9	328.8	314.1

和5 059.15 kN,均在斜拉索可承受范围内,但该索力作为预张拉索力过大,可能对结构安全造成潜在隐患^[20]。与工况1不提前挂设斜拉索进行吊机卸载相比,挂索对焊缝位置受力有利,挂索预拉后体系刚度较大,整体变形更小,卸载后截面相对变形过程更平稳可控。

(3) 分析拟定预张索力调整卸载比方案(工况4、5、6)结果可知:匹配变形差随着卸载比先减小后增大,最优卸载比分别为60%、70%和80%。随着预张索力增大所对应的最优卸载比逐渐增大。设定预张索力调整卸载比,相较于工况2和工况3调整卸载比确定预张索力,该方法以斜拉索位置荷载边界代替位移边界实现计算过程优化,快速计算得出拟定合理预挂索力下,所对应的最优卸载比,且实施精确匹配调整桥面吊机松钩卸载相较调整索力操作更方便,可减少工程控制的工作量,并避免索力过度张拉导致多次调索的问题。

3.2.4 最优卸载方案

通过对6个工况进行拟合分析,得出使截面匹配变形差最小的最优卸载比,结果如图10所示。由图10可知:当主梁处于最优卸载比时,待装梁段的自重、临时吊点力与斜拉索预张索力的竖向分力呈现明显线性相关关系。此时,总吊点提升力($\sum F_d$)、边腹板焊缝处需提供的总竖向力($\sum F_s$)、卸载力(S)和卸载比(η)满足如式(5)、(6)所示的关系:

$$\sum F_d = \sum F_s = \frac{G - \sum T_v}{2} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{S}{G} = \frac{G + \sum T_v}{2G} \quad (6)$$

确定提前挂索吊机卸载匹配方法所对应的最优卸载方案(即预张索力与卸载比)时,应兼顾工程可操作性、施工安全性和结构的稳定性,既要焊缝受力合理,又要避免过大的预张索力会对主梁施工安全

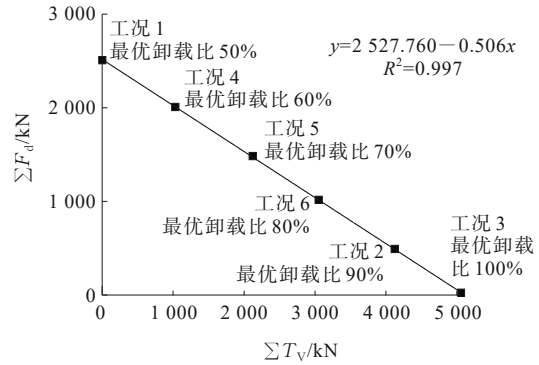


图10 最优卸载比拟合线

Figure 10 Optimal unloading ratio fitting line

不利并可能产生其他潜在问题。由式(5)可知,当斜拉索竖向分力平衡部分待装梁段自重后,且剩余荷载由吊点提升力和边腹板竖向剪力均分承担时,可实现最优卸载。此时,最优卸载比由式(6)计算确定,并参考类似工程对预张索力的选取经验,本文拟定的最佳卸载方案为:边腹板优先对齐,预张索力为2 500 kN,吊机卸载比为70%。该最优卸载方案下,待装与已装梁段的Mises应力和相对竖向变形如图11所示。

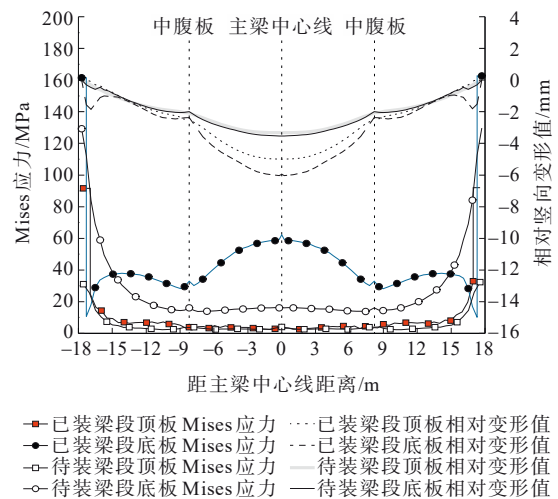


图11 最优卸载方案Mises应力及相对竖向变形值

Figure 11 Mises stress and relative vertical deformation values for optimal unloading scheme

由图11可知:在最优卸载方案下,待装和已装梁段的竖向相对变形趋于一致,截面变形协调,最大匹配变形差仅为2.20 mm,满足精确匹配要求(≤ 3 mm)。该方案无需多次调索,加快了施工速度,并减少了对码板等强制匹配措施的使用,匹配焊接后残余应力小,优化了匹配截面受力;边腹板焊缝安全系数达到2.3,仍可焊接边腹板附近顶底板形成C形焊缝进一

步优化边腹板受力^[21];边腹板焊缝及匹配件局部受力,可通过调节吊点提升力实现平稳控制。待装梁段的空间位置通过吊机送钩动作和预挂斜拉索的配合进行精确调整。匹配过程主梁变形协调、受力安全,可实现全截面低应力精确匹配。

4 结论

本文以超千米级宽幅混合式组合梁斜拉桥——观音寺长江大桥为工程背景,对斜拉桥宽幅钢-UHPC组合梁悬拼变形分析与控制展开研究。主要结论如下:

(1) 待装梁段起吊重量引起的吊机前、后支点力是导致已装梁段匹配截面产生中部下挠的主要因素。

(2) 焊接边腹板后,采用提前挂索施加预张索力,结合吊机分级卸载,可使悬拼体系刚度增大,匹配截面变形可控、焊缝残余应力小,体现了该匹配方法的优越性。

(3) 本文提出的预张索力及卸载比的优化计算方法,以斜拉索位置荷载边界代替位移边界,通过先拟定合理预张索力再分级调整卸载比的方式,实现了快速高效的计算,实施匹配操作方便快捷,具有良好的实用价值。

(4) 最优卸载方案下,匹配截面相对竖向变形趋于一致,梁段空间位置精确可调,焊缝受力安全可控,可实现待装与已装梁段精准匹配,为斜拉桥宽幅钢-UHPC组合梁匹配提供了有效匹配变形差控制措施。

参考文献:

References:

- [1] 杨炎华,齐云慧.组合梁斜拉桥整体节段悬臂拼装足尺模型试验[J].桥梁建设,2014,44(4):40-44.
YANG Yanhua, QI Yunhui. Full-scale model tests for cantilever installation of integral blocks of composite girder cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2014, 44(4): 40-44.
- [2] 郝超,邱松定.大跨度钢斜拉桥扁平钢箱梁悬拼阶段相对变形研究[J].钢结构,2002,17(2):34-37.
HAO Chao, QIU Songding. The relative deformation study of flat steel box-shaped girder of long-span cable-stayed bridge during cantilever construction[J]. Steel Construction, 2002, 17(2): 34-37.
- [3] 徐金勇,颜全胜,王卫锋,等.斜拉桥扁平钢箱梁悬拼施工时的截面变形[J].华南理工大学学报(自然科学版),2007,35(3):127-131.
XU Jinyong, YAN Quansheng, WANG Weifeng, et al. Section deformation of flat hollow steel box girder of cable-stayed bridge during cantilever erection[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 35(3): 127-131.
- [4] 叶华文,管乐,卫星.斜拉桥扁平钢箱梁悬拼阶段对接变形有限元分析[J].公路交通科技,2009,26(5):69-74.
YE Huawen, GUAN Yue, WEI Xing. Analysis of section transverse deformation of flat steel box girder of cable-stayed bridge during cantilevered assembling based on finite element method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(5): 69-74.
- [5] 李忠三,雷俊卿,林道锦.嘉绍大桥钢箱梁悬臂拼装截面变形分析[J].桥梁建设,2014,44(1):31-36.
LI Zhongsan, LEI Junqing, LIN Daojin. Analysis of section deformation of steel box girder of Jiashao bridge during cantilever assembling[J]. Bridge Construction, 2014, 44(1): 31-36.
- [6] 王凌波,刘鹏,李源,等.宽幅钢箱梁斜拉桥悬拼匹配技术研究[J].中国公路学报,2016,29(12):102-108,141.
WANG Lingbo, LIU Peng, LI Yuan, et al. Research on matching technology in cantilever erection for wide steel box girder of cable-stayed bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(12): 102-108, 141.
- [7] 蔡炎标,孙立鹏,杨岳华,等.钢箱组合梁斜拉桥悬拼阶段主梁变形及受力研究[J].世界桥梁,2022,50(6):86-93.
CAI Yanbiao, SUN Lipeng, YANG Yuehua, et al. Study of main girder deformation and load bearing behavior of cable-stayed bridge during cantilever assembly of steel box-concrete composite girder[J]. World Bridges, 2022, 50(6): 86-93.
- [8] HU J S, LI P H. Integral fabrication and hoisting technology of curved continuous steel box girder[M]. Water Conservancy and Civil Construction Volume 1. London: CRC Press, 2023: 274-280.
- [9] 曹明明,韩洋洋,魏乐永.大跨斜拉桥宽幅PK组合梁节段吊装精确匹配技术[J].桥梁建设,2019,49(6):54-59.
CAO Mingming, HAN Yangyang, WEI Leyong. Precise matching technique for segmental lifting and erection of wide PK composite girder of long-span cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2019, 49(6): 54-59.
- [10] 邹力,聂振龙,魏俊.牌楼长江大桥钢箱梁“梁重转移”吊装技术应用分析[J].世界桥梁,2020,48(4):21-24.
ZOU Li, NIE Zhenlong, WEI Jun. Study of using “girder weight transfer” technique to erect steel box girders of Pailou Changjiang River highway bridge[J]. World Bridges, 2020, 48(4): 21-24.
- [11] 张晶,赵全成,戚原.武汉青山长江公路大桥宽幅钢箱梁悬臂拼装横向线形匹配技术[J].桥梁建设,2024,54(2):139-144.
ZHANG Jing, ZHAO Quancheng, QI Yuan. Transverse

- alignment matching techniques for cantilever-assembled wide steel box girders of Wuhan Qingshan Changjiang River highway bridge[J]. *Bridge Construction*, 2024, 54(2): 139-144.
- [12] 吴启和, 陈鸣, 罗承斌. 苏通大桥标准钢箱梁匹配技术研究[J]. *中外公路*, 2008, 28(5): 124-127.
WU Qihe, CHEN Ming, LUO Chengbin. Research on matching technology of standard steel box girder of Sutong bridge[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2008, 28(5): 124-127.
- [13] 姜志刚, 唐家睿. 温州七都大桥北汊桥主桥主梁精确匹配研究[J]. *世界桥梁*, 2023, 51(增刊1): 104-109.
JIANG Zhigang, TANG Jiarui. Study of precise girder segment matching techniques for north main bridge of Qidu bridge in Wenzhou[J]. *World Bridges*, 2023, 51(sup 1): 104-109.
- [14] 孙立鹏, 刘永健, 杨岳华, 等. 台州湾跨海大桥通航孔桥悬拼匹配关键问题研究[J]. *桥梁建设*, 2018, 48(6): 116-121.
SUN Lipeng, LIU Yongjian, YANG Yuehua, et al. Research on key problems of matching technology in cantilever erection of navigation opening bridge of Taizhou Bay cross-sea bridge[J]. *Bridge Construction*, 2018, 48(6): 116-121.
- [15] 杨岳华. 宽幅组合梁斜拉桥主梁节段预制与安装力学性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
YANG Yuehua. Research on mechanical properties of girder segment during precast and installation in composite cable stayed bridge with wide width[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [16] 王兴. 悬拼施工组合梁斜拉桥索梁锚固区桥面板开裂问题研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
WANG Xing. Research on cracking of bridge deck in cable-girder anchorage zone of cable-stayed bridge with cantilever assembling construction[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [17] 袁博, 王晓雷, 邹本辉. 大跨径斜拉桥扁平钢箱梁悬臂拼装截面变形分析[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2019, 15(10): 195-199.
YUAN Bo, WANG Xiaolei, ZOU Benhui. Deformation analysis of cantilever assembly section of flat steel box girder of long-span cable-stayed bridge[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2019, 15(10): 195-199.
- [18] 冯鹏程, 刘新华, 易蓓, 等. 湖北观音寺长江大桥主桥方案构思与总体设计[J]. *桥梁建设*, 2023, 53(增刊1): 1-8.
FENG Pengcheng, LIU Xinhua, YI Bei, et al. Concept development and overall design for main bridge of Guanyinsi Changjiang river bridge in Hubei Province[J]. *Bridge Construction*, 2023, 53(sup 1): 1-8.
- [19] 邵旭东. 桥梁设计百问[M]. 3版. 北京: 人民交通出版社, 2017.
SHAO Xudong. Questions & answers for bridge design [M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [20] 蒲洁, 李江, 王天琪, 等. 斜拉桥索力张拉优化方法研究[J]. *交通科技*, 2023(5): 57-61.
PU Jie, LI Jiang, WANG Tianqi, et al. An optimization method for cable tension of cable-stayed bridges[J]. *Transportation Science & Technology*, 2023(5): 57-61.
- [21] 周雨. 深中通道中山大桥超宽钢箱梁悬臂拼装横向变形分析及对策措施[J]. *中外公路*, 2024, 44(4): 197-202.
ZHOU Yu. Transverse deformation and countermeasures of cantilever assembly of super-wide steel box girder of Zhongshan bridge over Shenzhen-Zhongshan link[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2024, 44(4): 197-202.