

# 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

周雨

(广东华路交通科技有限公司,广东 广州 510420)

**摘要:**针对斜拉桥超宽幅钢箱梁悬臂拼装过程中存在横向变形问题,该文根据深中通道中山大桥双向八车道超宽钢箱梁施工特点,分析超宽钢箱梁悬臂拼装过程中横向变形产生的主要原因,结合目前国内外宽幅箱梁悬臂拼装施工中匹配高差调整工艺,创新性地提出“一字梁锁定+挂索初张拉匹配”工艺,较好地解决了中山大桥超宽钢箱梁悬臂拼装横向变形差问题。

**关键词:**超宽钢箱梁;悬臂拼装;横向变形;一字梁

**中图分类号:**U448.24

**文献标志码:**A

## Transverse Deformation and Countermeasures of Cantilever Assembly of Super-Wide Steel Box Girder of Zhongshan Bridge over Shenzhen-Zhongshan Link

ZHOU Yu

(Guangdong Hualu Transportation Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510420, China)

**Abstract:** In view of the transverse deformation of super-wide steel box girders of cable-stayed bridges during the cantilever assembly, the construction characteristics of the two-way eight-lane super-wide steel box girder of Zhongshan Bridge over Shenzhen-Zhongshan Link were analyzed, and the main causes of the transverse deformation during the cantilever assembly of the super-wide steel box girder were investigated. According to the matching height difference adjustment technology in the cantilever assembly construction of the wide box girder in China and abroad, this paper innovatively proposed a matching process of straight beam locking + initial tension of hanging cables, which better solved the problem of poor transverse deformation during the cantilever assembly of the super-wide steel box girder of Zhongshan Bridge.

**Keywords:** super-wide steel box girder; cantilever assembly; transverse deformation; straight beam

## 0 引言

随着城市规模不断发展,交通堵塞问题日趋严重,为缓解城市交通压力,加快城市间交通往来,建造大量大型跨江跨海桥梁,而扁平宽幅钢箱梁以其结构轻盈、抗扭、抗弯、抗风性能优势在越来越多斜拉桥建设中得到应用,如湛江海湾大桥主跨480 m,钢箱梁顶板宽度28.5 m;港珠澳大桥青州航道桥主跨458 m,钢箱梁顶板宽度33.8 m;润扬大桥北汊桥主跨

406 m,钢箱梁宽度37.5 m;苏通长江大桥主跨1 088 m,钢箱梁宽度38.4 m<sup>[1-2]</sup>。

斜拉桥钢箱梁悬臂拼装过程中,由于梁受力工况不同和各工序约束条件的变化,导致已装箱梁和待装箱横向变形状态产生较大差异,结合匹配难度大,并且钢箱梁越宽这种横向变形越大,如湛江海湾大桥横向变形高差25.2 mm、润扬大桥北汊桥横向变形高差38 mm等<sup>[3-4]</sup>。因此,在宽幅钢箱梁悬臂吊装过程中,解决已装梁与待装梁匹配结合成了重点和难点。

收稿日期:2023-08-23

作者简介:周雨,男,硕士,工程师.E-mail:515422322@qq.com

## 1 工程概况

深中通道是继港珠澳大桥之后,中国的又一世界级跨海通道集群工程,深中通道地处珠江中游核心区域,位于虎门大桥与港珠澳大桥之间,连接深圳与中山市、江门市等地,全长约 24 km,由桥、岛、隧、水下互通组成<sup>[5-6]</sup>。其中山大桥为双塔双索面钢箱梁斜拉桥,索塔采用门形主塔,斜拉索采用扇形布置,其跨径组合为 $(110+185+580+185+110)$  m=1 170 m。钢箱梁梁高 4 m,全宽 46 m(含风嘴),拉索横向间距 41.5 m,拉索之间为行车道范围,东、西主塔主跨侧各有 15 对斜拉索,斜拉索索距 18 m,索区箱梁主要参数如表 1 所示。

表 1 索区梁段主要参数

Table 1 Main parameters of stayed cable segment

节段编号	节段长度/ m	梁段质量/ ( $10^3$ kg)	吊装方式
S1、Z1	15.00	369	桥面吊机
S2~S8、Z2~Z15	18.00	428	桥面吊机
S12~S14	18.00	428	桥面吊机
S9、S11	18.00	495	桥面吊机
S10	18.00	783	浮吊
S16	9.25	300	浮吊
HL	10.00	233	桥面吊机

索区梁段采用悬臂拼装法施工,桥面吊机采用两台额定吊重 295 t 的液压吊机抬吊,两台吊机距离桥面中轴线 13.55 m,每台质量  $170 \times 10^3$  kg,前支点置于横隔板上离悬臂梁端 4 m,后锚点与前支点纵向距离 18 m,吊点顺桥向可调  $\pm 0.8$  m(图 1)。

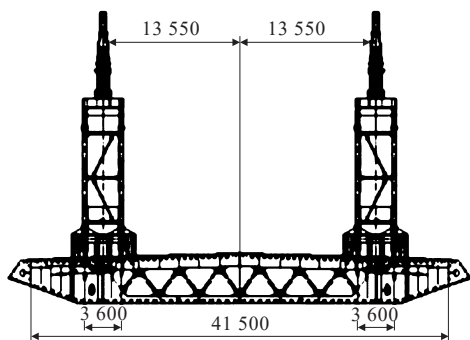


图 1 桥面吊机站位示意图(单位:mm)

Figure 1 Bridge deck crane location (unit: mm)

## 2 斜拉桥钢箱梁悬拼安装工艺

中山大桥中跨、边跨位置的水深均满足大吨位船只航行,因此主塔无索区、辅助墩、过渡墩顶钢箱梁采用支架浮吊安装法,索区标准梁段采用了双悬臂拼装方案。梁段悬拼的主要流程为:①节段梁运至桥位,精准调整运输船位置,安装吊具,主塔两侧节段梁同步起吊离船;②节段梁提升至桥面就位,在夜晚外部气温恒定情况下,箱梁顶底板温度接近时进行节段梁标高、轴偏、里程、焊缝错差调整,达到监控指令和焊评工艺要求,并在第 2 天早上气温回升前完成相应的码板和焊接;③斜拉索张拉和桥面吊机前移,进入下节段箱梁安装。

## 3 横向变形分析

深中通道中山大桥主梁为扁平薄壁箱形截面,在荷载作用下会产生竖弯、横弯、纵弯、翘曲等现象<sup>[7-8]</sup>,为分析箱梁产生横向变形的主要因素,本文以中山大桥 S2 梁段为实例,运用 Ansys 软件建模进行有限元分析。

中山大桥钢箱梁在悬臂拼装过程中,悬臂梁段箱梁主要受到桥面吊机重量、预吊装梁质量、斜拉索拉力和该梁体质量的作用。造成箱梁变形的主要荷载是桥面吊机质量和起吊梁段引起的支反力,根据桥面吊机重心位置参数计算吊机前支点反力,并通过集中力的方式反映于分析模型中。斜拉索的索力可通过深中通道空间杆系有限元计算模型进行分析,斜拉索垂度效应采用精确的悬链线单元模拟<sup>[9-10]</sup>。

中山大桥钢箱梁的安装调位、量测均在 22:00 后外部温度恒定时进行,此时钢箱梁顶、底板间温度接近一致,横向变形分析时可忽略钢箱梁横、纵、竖向的温度梯度影响<sup>[11]</sup>。

空载状态悬臂端箱梁有限元计算结果如图 2 所示,在桥面吊机起吊前空载状态,悬臂梁端最大下挠位移在节段梁中部,下挠 41.9 mm,外腹板处下挠 29.4 mm,横向相对变形 12.5 mm。由结果可知:桥面吊机空载状态悬臂端主要为桥面吊机自重引起的梁端整体下挠,桥面吊机自重对箱梁横向相对变形的影响较小。

图 3 为起吊状态悬臂端箱梁有限元分析结果,悬臂梁端最大下挠位移在节段梁中部,下挠 144.1 mm,

外腹板处下挠83 mm,横向相对变形61.1 mm。由结果可知:起吊后,桥面吊机前支点支反力对箱梁横向相对变形影响较大。

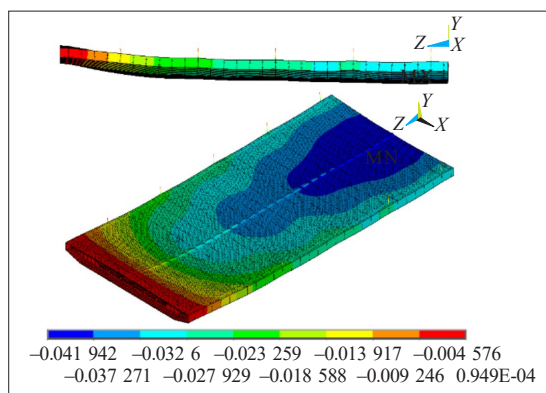


图2 空载状态悬臂端箱梁有限元分析(单位:m)

Figure 2 Finite element analysis of cantilever end box girder under no load (unit:m)

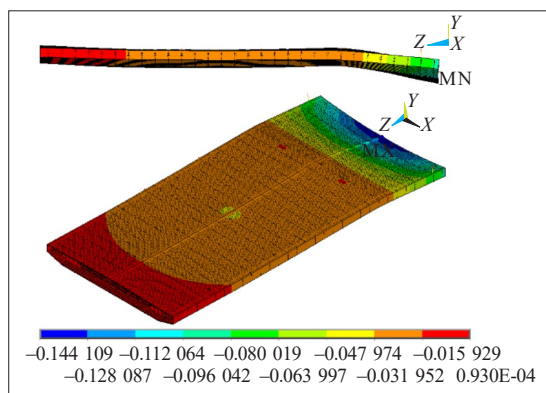


图3 起吊状态悬臂端箱梁有限元分析(单位:m)

Figure 3 Finite element analysis of cantilever end box girder in hoisting state (unit:m)

图4为起吊状态预吊装箱梁有限元分析结果,预吊装梁段中部最大下挠位移14.2 mm,与外腹板处相对横向变形4.3 mm。由结果可知:预吊装梁段自重对箱梁横向相对变形影响较小。

对比桥面吊机空载和起吊状态下悬臂端箱梁横向变形可知,桥面吊机起吊状态前支点支反力是影响悬臂箱梁端部横向变形主要因素,两者变形相差38.6 mm,桥面吊机卸载后悬臂端箱梁将有很大回弹变形。对比桥面吊机空载状态下悬臂端箱梁和起吊状态下待装梁横向变形可知,两者高差约8 mm,桥面吊机自身质量和悬臂端箱梁自身质量对已装箱梁端部变形影响较小,但随箱梁宽度增加和桥面吊机自重增大,此变形差将会越大。对比吊装状态悬臂端

箱梁横向变形和待装箱梁横向变形可知,悬臂端箱梁横向变形远远大于待装梁段横向变形,最大变形高差约55.7 mm,如图5所示,如此大的变形高差采用传统工艺进行强行匹配将会产生较大的残余应力,甚至造成箱梁局部变形。

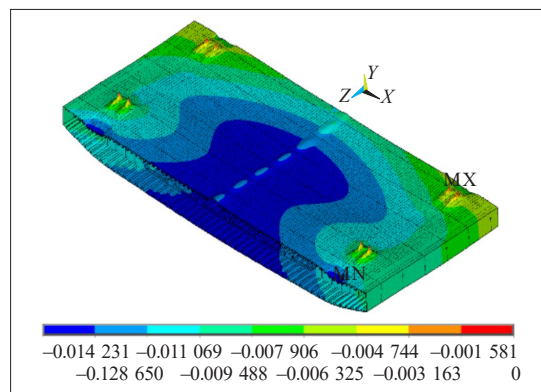


图4 起吊状态预吊装箱梁有限元分析(单位:m)

Figure 4 Finite element analysis of pre-hoisted box girder in hoisting state (unit:mm)

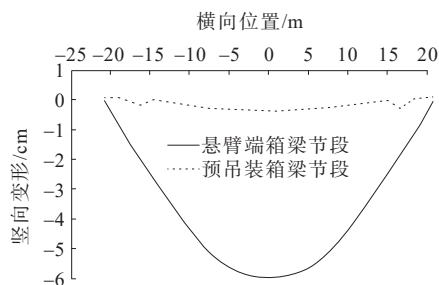


图5 起吊状态悬臂端箱梁和预吊装箱梁高差

Figure 5 Height difference between cantilever end box girder and pre-hoisted box girder in hoisting state

## 4 对策措施

目前中国解决钢箱梁悬臂施工中匹配高差问题主要有两种方案。方案1:以上海长江大桥为例,在预吊装梁段安装反力架,利用反力架在梁段中部施加反力,产生与悬臂梁段相近受力荷载工况,以此达到两箱梁段变形相似;方案2:以港珠澳大桥青州航道桥为例,采取先焊接外腹板,再通过对吊机卸载,减小吊机前支点反力,减小悬臂梁端横向变形,完成匹配<sup>[12-13]</sup>。

以上两种方案均不适合深中通道中山大桥钢箱梁悬拼施工,方案1反力支架结构体系庞大,不但增加了预吊装梁段质量,同时反力架与桥面吊机存在空间冲突,大幅提高施工安全风险;方案2通过焊接



边腹板,桥面吊机卸载有限,通过有限元分析,桥面吊机可卸去45%荷载工况下,钢箱梁仍存在4 cm左右的匹配高差。综合以上方案优点,对于中山大桥,提出一字梁锁定+挂索初张拉方案,通过有限元分析,桥面吊机卸载80%后,一字梁和C形焊缝应力为 $-45\sim 40$  MPa,与环焊缝全施工状态下,该位置焊缝应力为 $-45\sim 35$  MPa,相差较近。

具体步骤如下:① 桥面吊机起吊,待吊箱梁就位。两侧外腹板对齐,里程、高程、缝宽进行调整直至满足监控指令要求;② 安装一字梁临时锁定。一字梁在钢梁制造时,随匹配件一起焊接在两箱梁边腹板附近的顶板上,如图6所示。待现场安装时,只需进行栓接;③ 焊接边腹板和其1 m范围内顶底板焊缝,共同形成C形焊缝,提高其稳定性,如图7所示;④ 待装箱梁挂索、张拉。综合考虑箱梁架设越长,张拉斜拉索产生的水平力越大以及一字梁和外腹板C形焊缝受力越小,为确保每根斜拉索能提供120 t竖向力,通过计算确定设定初张力;⑤ 两台桥面吊机同步缓慢卸去80%吊装荷载,前支点支反力减小,钢箱梁横向高差相应大幅减小。为确保架梁安全,桥面吊机卸去80%荷载,钢丝绳始终处于紧绷



图6 一字梁临时锁定

Figure 6 Temporary locking of straight beam

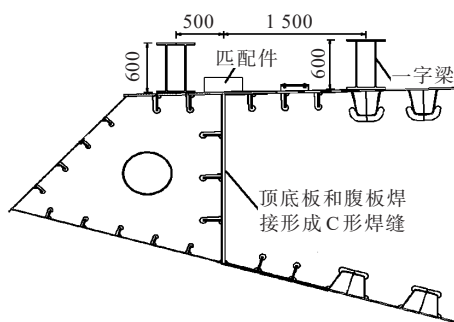


图7 C形焊缝示意图(单位:mm)

Figure 7 C-shaped welding line (unit:mm)

但不继续收紧的状态,实现局部卸载并保障梁段吊装的安全性,桥面吊机上自带吊重监测设备,可实时反馈桥面吊机卸载情况;⑥ 通过小型反力千斤顶和码板可调整剩余高差,完成梁段剩余高差匹配,进行环缝焊接;⑦ 第二次张拉斜拉索至监控指令索力、高程;⑧ 桥面吊机前移,安装下一节段箱梁。

外腹板一字梁锁定+挂索初张拉调梁方案实施应注意以下控制重点:

(1) 钢箱梁吊装过程中需对桥面吊机吊重实时监测,严格控制两台桥面吊机的卸载速率和比例。

(2) 斜拉索初张拉时需严格控制两斜拉索张拉同步性,上下游斜拉索张拉过程中,同步偏差小于3%,最大值与指定值偏差小于5%,确保两侧临时锁定结构受力相近。

(3) 斜拉索初张拉时,C形焊缝端部存在应力集中,需在底板焊缝位置对码板进行适当加密、加强,减少焊缝残余应力。施工中,应对底板焊缝和一字梁应力应变进行监测,并且辅助指导斜拉索张拉施工。

(4) 顶底板焊缝起熄弧应避开箱梁内腔U肋和板肋端部,避免产生焊接质量问题。

## 5 监控量测结果

中山大桥钢箱梁吊装过程对梁段匹配高差、焊缝宽度、索力张拉值等关键控制参数进行跟踪监测,对应力集中点进行应力应变监测。每节悬臂端箱梁顶板和底板各布设7个观测点,分别为中线、距离中线左右6.0 m、12.5 m和两侧边腹板位置以及对应待装梁相同位置布设观测点。本文以中山大桥东塔边跨S3、S4、S5号梁段和西塔S3、S4梁段为例,在夜间气温恒定环境下,量测两钢箱梁在桥面吊机卸载前后观测点位置高差、缝宽变化情况。

桥面吊机起吊箱梁就位,预吊装梁与悬臂端箱梁外腹板对齐,横向最大高差约60.7 mm,位于箱梁中部,呈对称分布,如图8、9所示,与有限元分析结果基本相近。悬臂端箱梁和预装箱梁外腹板焊接锁定,斜拉索初张拉,桥面吊机卸去80%荷载后悬臂端箱梁和预装箱梁间横向高差最大约18 mm,如图10、11所示。与卸载前对比,高差减小较大,同时斜拉索初张拉和桥面吊机卸载前后箱梁环形焊缝宽度变化较小,一字梁和C形焊缝附件钢板实际监测应力均在50 MPa以内,与理论计算值相近。

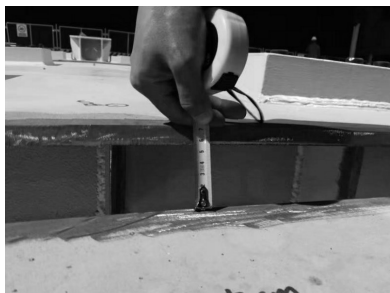


图8 钢箱梁调整前现场高差

Figure 8 Site height difference before adjustment of steel box girder

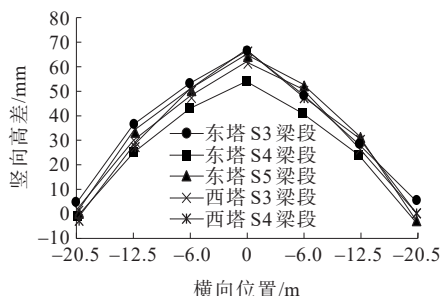


图9 卸载前悬臂箱梁和预装梁匹配高差

Figure 9 Matching height difference between cantilever box girder and prefabricated girder before unloading



图10 钢箱梁调整后现场高差

Figure 10 Site height difference after adjustment of steel box girder

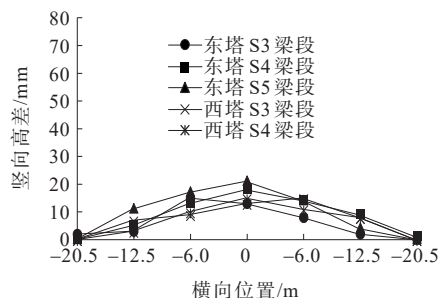


图11 卸载后悬臂箱梁和预装梁匹配高差

Figure 11 Matching height difference between cantilever box girder and prefabricated girder after unloading

由桥面吊机卸载前后监控测量结果对比可知:中山大桥扁平节段箱梁因设计宽且重,采用悬拼法安装钢箱梁产生较大横向变形差,该变形差比以往工程变形差大1~2倍,传统工艺无法满足施工。桥面吊机卸去80%荷载,变形差可以减小2/3,剩余高差较小,可由反压千斤顶局部调整解决;一字梁和C形焊缝组合下该位置焊缝实际应力比理想全环焊缝状态下部分位置增大约1/10,一字梁和焊缝受力合理,可以满足锁定强度和刚度要求,C形焊缝端部等应力集中位置可以通过加密码板减小残余应力。此外,由于该工艺增加腹板焊接锁定和初张拉等工序,与焊接标和安装标交叉作业,对架梁工作效率有一定影响,现场应制定移交管理办法,明确并落实各方责任,以确保工序衔接紧凑。

## 6 结论

深中通道中山大桥钢箱梁节段比以往工程钢箱梁节段宽和重,悬臂拼装横向变形亦比以往工程钢箱梁变形大,传统工艺无满足匹配要求,本文提出外腹板锁定+挂索初张拉方案能较好地解决斜拉桥超宽幅钢箱梁高差匹配问题,安装完成后,钢箱梁高程线形、斜拉索索力均满足设计要求。主要结论如下:

(1) 横向变形是超宽钢箱梁悬臂安装施工中主要问题,钢箱梁尺寸决定了横向变形大小。合理的钢箱梁尺寸是悬臂拼装正常施工的重要前提,设计阶段应综合考虑钢箱梁节段横向刚度和箱梁质量对钢箱梁悬拼匹配影响。

(2) 桥面吊机前支点支反力是悬臂端箱梁产生横向变形的主要因素,中山大桥桥面吊机卸掉80%的荷载时,箱梁横向变形差可减小2/3,剩余变形差较小,可采用反力千斤顶进行调整。当剩余变形仍较大,可考虑在锁定结构受力安全前提下,桥面吊机可全部卸载,大幅度减小横向变形差。

(3) 采用外腹板锁定+挂索初张拉工艺,可较好地解决60.7 mm以内箱梁横向变形高差问题。在实施过程中,必须严格监控斜拉索和桥面吊机力值。

(4) 一字梁和外腹板C形焊缝组合,不仅具有较好强度和刚度,还在斜拉索初张拉和桥面吊机卸载过程中能有效锁定,防止钢箱梁节段产生较大残余应力和变形。

## 参考文献:

## References:

- [1] 周望.南京浦仪公路西段跨江大桥主桥施工技术[J].世界桥梁,2021,49(1):7-13.  
ZHOU Wang. Construction techniques for main bridge of west river-crossing section of Puyi Highway in Nanjing[J]. World Bridges,2021,49(1):7-13.
- [2] 刘爱林,李旭,任引亮.商合杭铁路芜湖长江公铁大桥北引桥公路钢箱梁安装技术[J].桥梁建设,2019,49(6):114-119.  
LIU Ailin, LI Xu, REN Yinliang. Construction techniques for highway steel box girders of north approach bridge of Wuhu Changjiang River Rail-Cum-Road Bridge on Shangqiu-Hefei-Hangzhou Railway[J]. Bridge Construction, 2019, 49(6):114-119.
- [3] 叶华文,管乐,卫星.斜拉桥扁平钢箱梁悬拼阶段截面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.
- [4] 马琼峰,严小卫.超宽混合梁斜拉桥钢箱梁悬臂拼装施工关键技术[J].中外公路,2019,39(6):144-146.  
MA Qiongfeng, YAN Xiaowei. Key technology for cantilever erection construction of steel-box girders of cable-stayed bridges with ultra-wide hybrid girders[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(6):144-146.
- [5] 宋神友,陈伟乐,金文良,等.深中通道工程关键技术及挑战[J].隧道建设(中英文),2020,40(1):143-152.  
SONG Shenyou, CHEN Weile, JIN Wenliang, et al. Key technologies and challenges of Shenzhong Link[J]. Tunnel Construction,2020,40(1):143-152.
- [6] 吴玲正.深中通道项目桥梁设计方案及主要技术难点[J].中外公路,2021,41(2):189-192.  
WU Lingzheng. Design scheme and main technical challenges of Shenzhen-zhongshan Bridge project[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(2):189-192.
- [7] 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.
- [8] 付甦,曾健,杨苏海,等.装配式深水组合钢板桩围堰设计[J].中外公路,2023,43(4):165-169.  
FU Su, ZENG Jian, YANG Suhai, et al. Design of prefabricated deep-water combined steel sheet pile cofferdam[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(4):165-169.
- [9] 贺拴海,梅晓亮,刘鹏,等.宽幅钢箱梁斜拉桥空间行为数值分析[J].中国公路学报,2016,29(4):42-49,58.  
HE Shuanhai, MEI Xiaoliang, LIU Peng, et al. Numerical analysis on spatial behavior of cable-stayed bridge with wide steel box girder[J]. China Journal of Highway and Transport,2016,29(4):42-49,58.
- [10] 章斌,左翼,王昌喜,等.嘉鱼长江公路大桥钢箱梁施工关键技术研究[J].中外公路,2021,41(3):165-170.  
ZHANG Bin, ZUO Yi, WANG Changxi, et al. Construction technology of steel box girder installation for main bridge of Jiayu Yangtze River Highway Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(3):165-170.
- [11] 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.
- [12] 丁幼亮,王高新,周广东,等.基于长期监测数据的润扬大桥扁平钢箱梁温度分布特性[J].中国公路学报,2013,26(2):94-101.  
DING Youliang, WANG Gaoxin, ZHOU Guangdong, et al. Temperature distribution on flat steel box girders of Runyang Bridges based on long-term measurement data [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2):94-101.
- [13] 涂光亚,周郅哲.大跨度钢箱梁斜拉桥主梁制造误差分析与优化调整[J].中外公路,2023,43(3):88-92.  
TU Guangya, ZHOU Zhizhe. Analysis and optimal adjustment of manufacturing errors of main girder of long-span steel box cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(3):88-92.