

# 钢-混组合梁斜拉桥钢主梁安装方法分析与误差控制

熊先勇<sup>1</sup>,傅亚军<sup>2</sup>,黄蓁<sup>3\*</sup>

(1.湖南路桥建设集团有限责任公司,湖南 长沙 410018;2.中交第二航务工程局有限公司设计研究院,湖北 武汉 430000;  
3.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**钢-混组合梁斜拉桥的钢主梁安装相比纯钢梁斜拉桥更复杂,安装误差控制的难度更高。该文以双边箱截面组合梁为研究对象,建立有限元模型对组合梁的钢主梁安装方法进行对比分析,根据安全受力原则选择最佳的安装方法,并对钢主梁安装误差的产生原因进行分析,提出相应的误差控制方法。

**关键词:**组合梁斜拉桥;钢主梁;安装方法;误差控制

**中图分类号:**U445.4;U448.27

**文献标志码:**A

## 0 引言

钢-混组合梁斜拉桥的建设发展迅速<sup>[1-4]</sup>,目前最大跨径已达720 m。钢-混组合梁斜拉桥的钢主梁通常为格构式主梁,由双边主纵梁、横梁、小纵梁和其他连接件组成,其截面类型分为双边工字形和双边箱形。相比于整体式钢箱梁,格构式钢主梁的组成部件较多,结构更复杂,拼接难度更高<sup>[5-8]</sup>。且各钢构件通过高强螺栓进行连接,这种连接方式比焊接的精度要求更高,基本无法通过螺栓孔与高栓的直径差进行主梁角度调整。在组合梁斜拉桥的悬臂施工过程中,由于架梁吊机等临时荷载的不规则站位,也会对悬臂主梁的姿态造成不利影响。钢主梁安装方法的选择与安装误差的控制是组合梁斜拉桥的成桥线形能否达到目标线形的关键<sup>[9-12]</sup>。对于钢主梁安装过程中产生的误差,如不及时进行调整与修正,则会造成误差的累积与放大,甚至危及结构安全<sup>[13-16]</sup>。此外,钢主梁安装方法的正确选择与改进可以保证结构力学性能优越的同时减少工程建设周期,达到节材降耗的目的<sup>[17-21]</sup>。

秦顺全<sup>[22]</sup>提出的无应力状态法理论表明构件的制造尺寸及精确安装决定了桥梁最终能否达到合理

成桥状态。现阶段国内外对组合梁斜拉桥的研究以力学性能分析、剪力钉的滑移和混凝土的收缩徐变为主<sup>[23-28]</sup>,在钢主梁制造安装等现场实际施工方面的研究相对较少。对于钢主梁安装误差产生的原因、规律及其在施工过程中的影响和控制手段等方面还需要进行更加深入的研究。

为了确保主梁安装过程中的结构安全性与提高主梁施工的精确度,本文对双边箱截面(大跨度组合梁斜拉桥的钢主梁采用双边箱截面形式,相比于双边工字截面,受力性能更优,但刚度更大,从而安装误差的调整难度更大)的组合梁斜拉桥钢主梁安装方法进行对比研究,以某大跨度组合梁斜拉桥为背景,建立有限元模型进行工况模拟,标准节段见图1,并针对钢主梁安装误差的产生原因,提出相应的误差控制方法,通过相关应用进行验证。

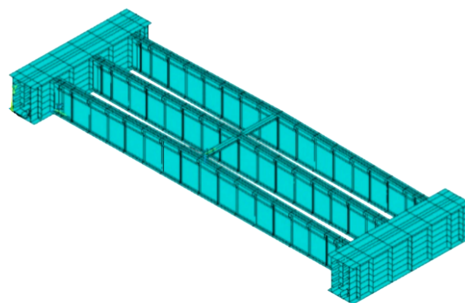


图1 标准节段钢主梁

收稿日期:2022-12-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878073,52278141)

作者简介:熊先勇,男,大学本科,高级工程师.E-mail:21845918@qq.com

\*通信作者:黄蓁,男,博士研究生.E-mail:37679609@qq.com

## 1 组合梁钢主梁安装方法分析

对于斜拉桥结构,不同的主梁拼装形式会对施工过程中的应力水平产生较大影响。格构式钢梁的安装分为钢梁整体节段吊装和散件悬臂拼装两种形式。整体节段吊装方法因钢主梁、横梁等的拼接工作在吊装前便已完成,可以有效提高施工效率,但对运输、吊装条件和受力安全(吊装状态下对已安装主梁的桥面板产生的拉应力较大)的要求较高。采用散件悬臂拼装的方法可避免钢梁节段大件运输以及大型桥面吊机等设备的投入,对结构受力的要求更低,但散件拼装法对安装精度的要求更高,且单一的施工作业面也限制了施工的进度。

针对组合梁斜拉桥的格构式钢主梁施工方法的选择问题,通过建立 Ansys 有限元模型,计算分析两种方法对整体及局部受力的影响,在满足材料应力允许的前提下结合施工现场实际情况选择更优的钢主梁安装方法。

### 1.1 整体安装

整体节段吊装如图2所示。在此方案中架梁吊机自重3400 kN,最大支反力为19 m悬臂吊重状态( $2000\text{ kN} \times 1.1$ ),此时前支点受力为 $2340\text{ kN} \times 4$ ,后支点受力为 $-940\text{ kN} \times 4$ 。前、后支点均采用油缸通过垫板支撑于桥面板上,垫板尺寸分别为 $1000\text{ mm} \times 1000\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$ 、 $650\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ,后锚耳板焊接于钢梁主体结构顶面。

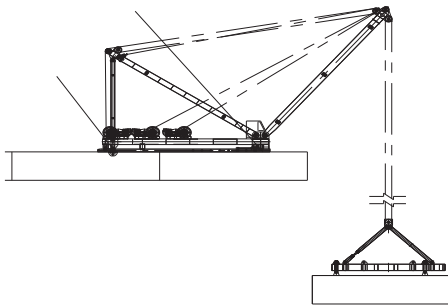


图2 整体起吊示意

采用 Ansys 软件对吊机整体起吊过程中最不利状态进行局部受力分析。根据力学原理可知,悬臂端施工对较远处的近塔端影响较小,因此可用部分梁段一端固结,另一端悬臂,斜拉索锚固处添加刚性

支撑的方法来模拟实际情况进行求解。假设已架设标准梁段 ZL2~ZL5,在架设 ZL6 时,吊机悬臂吊重状态下,对组合梁进行受力分析。

模型1如图3所示,已架设梁段包括 ZL2~ZL4 的组合梁和 ZL5 的钢梁部分,此时吊机前支点位于悬臂端2 m的钢主梁和横梁上,后支点位于距离前支点16 m处对应的桥面板上,模拟双节间架设时整体起吊第二节段钢梁的工况。模型2如图4所示,已架设完毕标准梁段 ZL2~ZL5 组合截面,架梁吊机前支点位于 ZL5 距离悬臂端2 m处的桥面板上,后支点位于距离前支点16 m处对应的桥面板上,模拟单节间架设或双节间架设第1节段钢梁。在吊机悬臂吊重状态下,对这两种情况下的钢主梁和桥面板进行受力分析。

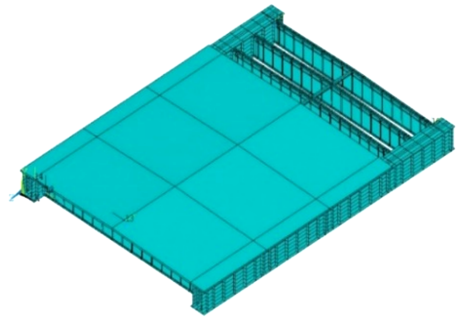


图3 前支点作用于钢主梁(模型1)

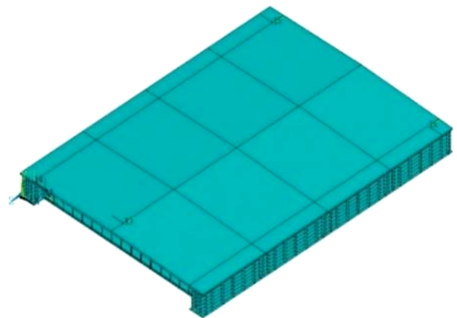


图4 前支点作用于组合梁(模型2)

在上述两种工况的有限元模型中,组合梁各部位采用的单元类型如表1所示,各单元的材料参数如表2所示。C60混凝土桥面板的轴心抗压强度设计值 $f_{cd}$ 为26.5 MPa,轴心抗拉强度设计值 $f_{td}$ 为1.96 MPa。钢主梁采用Q420钢材,抗拉压强度设计值取为320 MPa,Q370的横梁和小纵梁的抗拉压强度设计值取为290 MPa。为保证一定的安全系数,钢材容许抗拉压强度取为 $0.8f_d$ 。

表 1 有限元建模单元类型

部位	单元类型	单元名称	节点数/个
桥面板	钢筋混凝土实体单元	Solid65	8
钢主梁	有限应变壳单元	Shell181	4
小纵梁	有限应变壳单元	Shell181	4
横梁	有限应变壳单元	Shell181	4

表 2 材料特性表

材料	弹性模量/ MPa	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	线膨胀 系数	泊松 比	备注
钢材	$2.10 \times 10^5$	78.5	$1.2 \times 10^{-5}$	0.3	钢主梁
C60 混凝土	$3.60 \times 10^4$	26.5	$1.0 \times 10^{-5}$	0.3	桥面板
C50 混凝土	$3.45 \times 10^4$	26.0	$1.0 \times 10^{-5}$	0.3	主塔
C40 混凝土	$3.25 \times 10^4$	26.0	$1.0 \times 10^{-5}$	0.3	主塔塔座
C35 混凝土	$3.15 \times 10^4$	26.0	$1.0 \times 10^{-5}$	0.3	主塔承台
C30 混凝土	$3.00 \times 10^4$	26.0	$1.0 \times 10^{-5}$	0.3	主塔基础
平行钢丝	$1.95 \times 10^5$	78.5	$1.2 \times 10^{-5}$	0.3	斜拉索

计算荷载主要包括结构自重、吊机自重和起吊梁段重量。其中,吊机前、后支点处添加反力模拟吊机吊装过程中对组合梁的作用力。前支点根据架梁吊机布置情况在垫板处以面荷载形式施加在距离悬臂端 2 m 处的钢主梁和横梁上。后支点反力在距离前支点 16 m 处对应的钢主梁和横梁上,后锚耳板受力以节点力形式添加。前后支点力示意图如图 5 所示,端部边界条件和锚固处边界条件如图 6 所示。

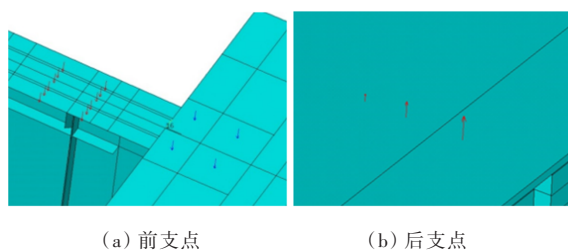


图 5 桥面吊机前后支点反力

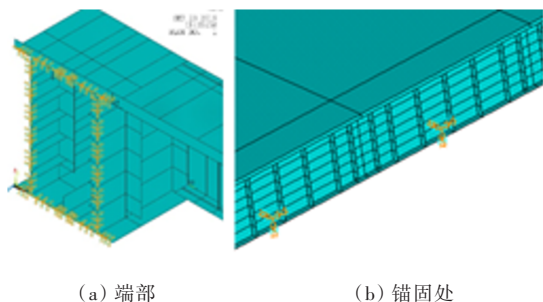


图 6 边界条件

模型 1 中吊机前支点作用力由钢梁承担,在整体

起吊 ZL6 节段时对 ZL4 梁段及 ZL5 梁段分别进行受力分析。ZL5 梁段的应力云图如图 7 所示,对应的刚性支撑处局部应力云图如图 8 所示;ZL4 梁段的应力云图如图 9 所示,对应吊机后支点处局部应力云图如图 10 所示。

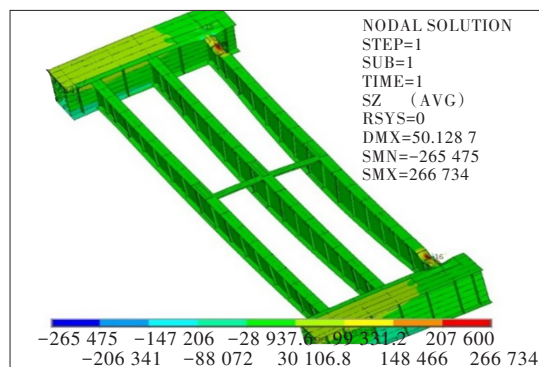


图 7 ZL5 梁段应力云图(单位:kPa)

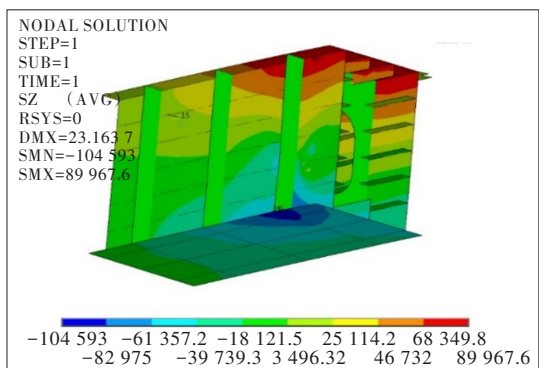


图 8 ZL5 梁段刚性支撑处应力云图(单位:kPa)

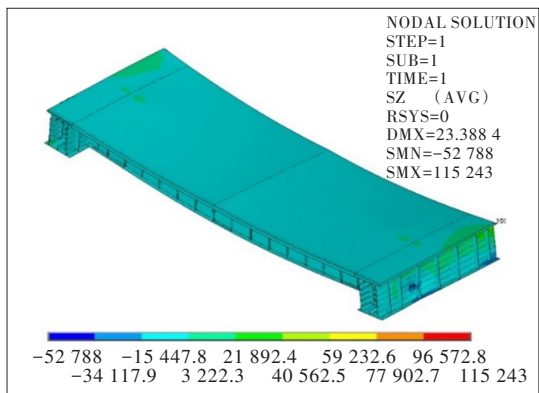


图 9 ZL4 梁段的应力云图(单位:kPa)

从图 7~10 可以得出:模型 1 中钢梁的最大拉应力为 89.968 MPa,方向为顺桥向,出现在 ZL5 斜拉索位置处的钢主梁顶面;钢梁最大压应力为 104.593 MPa,方向为顺桥向,出现在 ZL5 斜拉索位置处钢主梁底面,最大拉、压应力均小于 Q420qD 钢材的强度



设计值 320 MPa。最大拉、压应力区域为面荷载加载区域,该区域在实际工况中有 1 000 mm×1 000 mm×100 mm 垫板支撑加强,可以忽略此区域内的应力集中现象。由此可以得出此工况下主梁结构受力安全。

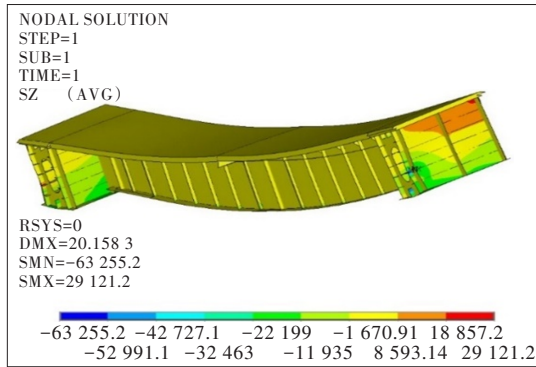


图 10 吊机后支点处局部应力云图(单位:kPa)

模型 2 中吊机前支点作用力由组合梁承担,此时为桥面板受力最不利情况,需重点考虑混凝土桥面板处的应力分布。混凝土桥面板应力云图如图 11 所示;在 ZL5 钢梁斜拉索锚固区域,桥面板应力云图如图 12 所示;刚性支撑区钢主梁的应力云图如图 13 所示。

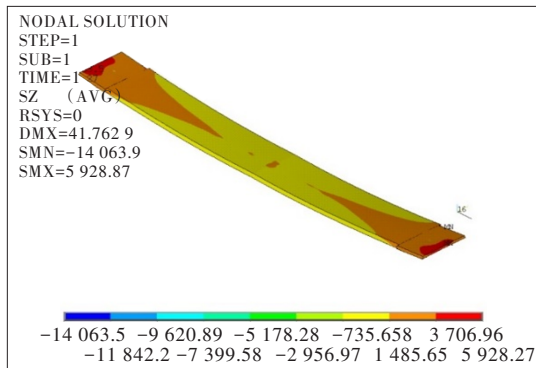


图 11 混凝土桥面板应力云图(单位:kPa)

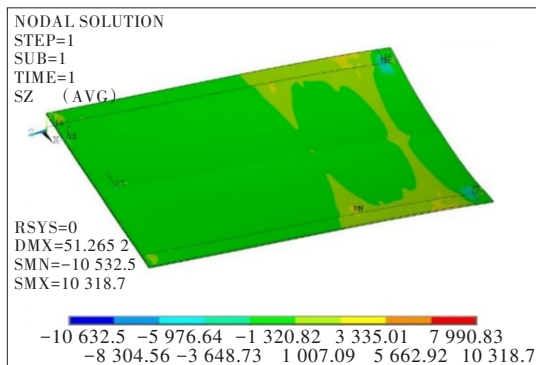


图 12 索区 2 m 范围内桥面板应力云图(单位:kPa)

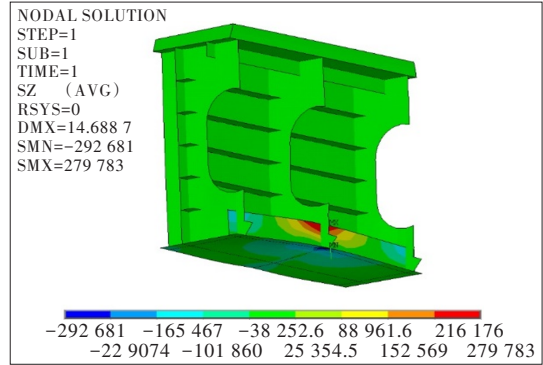


图 13 刚性支撑区钢主梁应力云图(单位:kPa)

由图 11、12 可知:混凝土最大拉应力为 10.319 MPa,方向为顺桥向,出现在吊机站位前支点位置处,取 ZL5 钢梁刚性支撑区桥面板,最大拉应力为 5.928 MPa,方向为顺桥向,大于 C60 混凝土的轴心抗拉强度设计值 1.96 MPa。由图 13 可知:钢梁最大拉应力为 279.783 MPa,方向为顺桥向,出现在斜拉索位置钢主梁顶面,大于 Q420qD 钢材强度设计值 256 MPa。钢梁最大压应力为 292.681 MPa,方向为顺桥向,出现在斜拉索位置钢主梁底面,大于 Q420qD 钢材强度设计值 256 MPa。由以上数据可以得出此模型中主梁结构受力不安全,钢梁若采用整体节段吊装无法满足容许应力要求。

## 1.2 散件安装

采用散件悬臂拼装方式安装主梁,具有吊装荷载较小、施工状态满足材料受力要求、可避免钢梁节段大件运输以及大型桥面吊机等设备的投入等优点。经过上文的计算分析可知,主梁施工无法采用整体节段吊装,继续对散件悬臂拼装进行分析。钢梁散件拼装过程中每个节段按照钢主梁→横梁→小纵梁的顺序进行,且边、中跨双悬臂对称架设钢梁,确保不平衡荷载满足设计要求。散件悬臂拼装具体架设流程如下:

(1) 钢主梁安装:两根钢主梁构件由桥面吊机逐根起吊。钢梁对接时,吊装钢主梁与前一个节段水平高度一致,将钢主梁和拼接板一起缓慢往梁端移动,每次起吊时设置缆风绳控制钢主梁半空转向,将前一个已架设节段钢主梁的底板、腹板全部插入待架节段钢主梁底板、腹板的拼接板之间,对接过程中严格控制钢主梁的轴偏、平面位置、纵坡,利用倒链进行微调。在这个过程中利用钢丝绳和吊具四点起吊钢主梁,吊耳焊接在钢主梁顶面。

(2) 横梁安装:横梁由岸侧运梁跑车、江侧运梁



船等运输到桥下安装位置。利用桥面吊机进行提升将横梁吊装至待安装位置的竖直上方,再缓慢下落,将横梁端部插入上下游侧钢主梁拼接板缝隙之间,将拼接板的螺栓孔与钢梁的孔眼对齐后打入冲钉。

(3) 小纵梁安装:同样利用桥面吊机进行起吊安装。

(4) 节段测量、调整:对钢梁一个节段的钢梁拼装完成后,对钢梁位置进行测量复核,严格控制钢梁的轴偏、上下游高差、纵坡。调整完毕后重新测量本节段,满足要求后才能进行下一道工序。

(5) 高栓施拧:每个节段钢梁按照钢主梁→横梁→小纵梁的顺序施拧。

(6) 顶板焊接:待高栓施拧完成后再进行顶板焊接。

钢主梁安装过程中需要计算其在桥面吊机的提升作用下因自重产生的变形量,可通过有限元仿真软件进行分析。在梁段提升过程中桥面吊机吊点的具体位置位于上顶板加劲肋与第2、4道横隔板的连接处,通过有限元仿真软件 Abaqus 的实体单元、Ansys 软件的 Shell63 壳单元分别建立模型相互校核,吊点采用1点铰接,其余3点仅约束竖向位移的方式模拟边界条件,计算所得结果如图14、15所示。

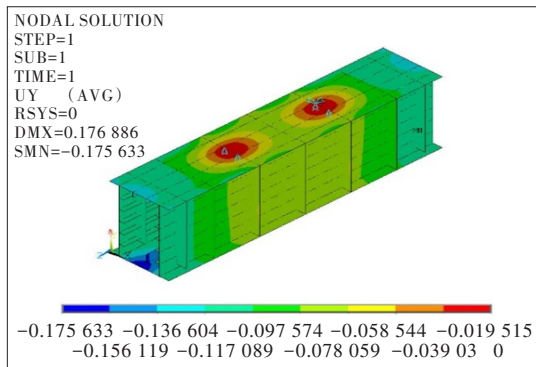


图 14 Ansys 分析结果(单位:mm)

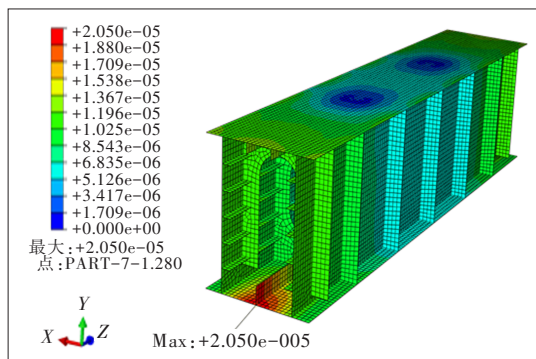


图 15 Abaqus 分析结果(单位:m)

由图14、15可知:在桥面吊机起吊过程中分别使用两种软件建立的不同类型单元模拟钢梁的最大位移均不超过1 mm。因此可以认为在散件拼装过程中钢主梁在吊机提升及自重作用下的线形是无应力构形。

主梁施工无法采用整体节段吊装,最终采用的施工方案为散件悬臂拼装,该方法满足施工过程中的结构受力要求。

## 2 安装误差分析

### 2.1 扭转误差

组合梁斜拉桥目前的趋势是朝着大跨径宽幅组合梁形式发展,在主跨跨径不断刷新的同时,梁段的横向截面尺寸也越来越大。通过各种工程实例及计算均可得出在宽幅组合梁斜拉桥中横向弯矩不可忽略。

在悬臂散件拼装过程中,钢主梁各构件的连接一般采用栓焊结合形式,在厂内制造时螺栓孔及拼接板采用无应力状态时的空间位置确定。而实际情况中由于斜拉索索力、自重、桥面吊机等临时荷载作用对钢主梁产生较大扭矩,钢主梁会发生扭转误差,这种误差会传递到新安装主梁节段,从而产生内外缘高差。散件拼装钢横梁时,如果钢主梁的扭转偏大,会导致钢主梁与横梁之间的螺栓孔群偏差过大,则无法顺利打入冲钉及后续高强螺栓,造成拼接困难。此时若进行螺栓群扩孔,会改变钢主梁构件的无应力尺寸,必定会对主梁内力产生不利影响。为求得横梁安装过程中钢主梁产生扭转的理论数值,利用Ansys建立局部模型如图16所示。

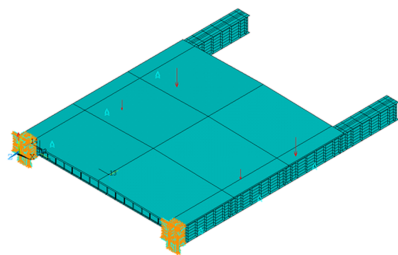


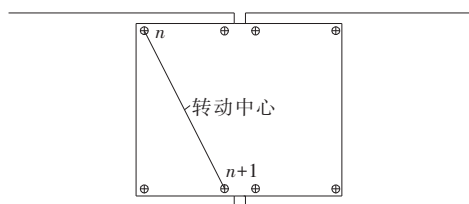
图 16 钢主梁扭转计算模型

根据仿真计算分析可得由于扭矩使得钢主梁内外腹板的扭转误差为8 mm,所以钢梁的扭转误差在钢梁安装过程中不可忽略。

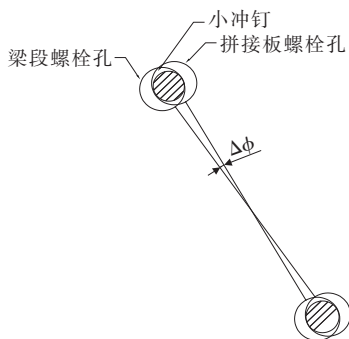
### 2.2 夹角误差

本文所分析的双边箱钢主梁在现场安装时采用

栓、焊两种方式连接。具体步骤为新架梁段 $N+1$ 在腹板、底板和加劲板处通过高强螺栓与已安装梁段 $N$ 相连,待高栓终拧完成后再进行顶板的焊接。通过拼接板进行栓接过程中,先安装50%的冲钉和10%的工具螺栓,在顶板处焊接4~5块码板防止钢梁定位完成后的轴偏变化。待50%的高栓初拧后余下的高栓进行初拧,最后进行终拧。为了保证钢梁安装定位时具备一定的局部线形调整能力,可以利用冲钉与螺栓孔之间的间隙去调整梁段无应力夹角(小冲钉外径大于高栓直径)。如图17(a)所示的 $n$ 、 $n+1$ 螺栓孔发生如图17(b)所示的转角。



(a) 钢主梁腹板及拼接板螺栓孔



(b) 对角线螺栓孔转角

图17 安装夹角误差示意

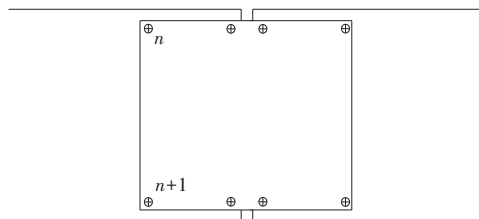
钢梁安装过程中采用小冲钉时导致新旧梁段之间的最大夹角误差为 $\pm 0.223\ 28^\circ$ ,大冲钉导致相邻梁段最大夹角误差为 $\pm 0.008^\circ$ 。由此可以看出使用小直径冲钉施工过程中应该格外注意其可能产生的夹角误差。

### 2.3 梁长误差

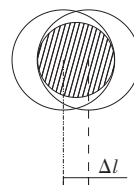
图18(a)为新旧梁段腹板及拼接板螺栓孔示意图,理论上同一垂直线上的螺栓孔如 $n$ 、 $n+1$ 打入冲钉时发生如图18(b)所示的误差。

同理另一梁段与拼接板相连时梁长最大误差为 $\Delta l$ (螺栓孔直径与冲钉直径之差),即一处拼接板理论上导致的最大梁长误差为 $\pm 2\Delta l$ 。钢主梁腹板及拼接板螺栓孔直径为33 mm,因施工需要采用两种

类型的冲钉,分别为直径32.8 mm的大冲钉和直径为30.2 mm的小冲钉。当使用大冲钉时梁长最大误差为 $\pm 0.4\text{ mm}$ ,当使用小冲钉时梁长的最大误差为 $\pm 5.6\text{ mm}$ 。



(a) 腹板处孔群示意



(b) 单个螺栓孔误差示意

图18 安装梁长误差示意

## 3 安装误差控制

### 3.1 扭转控制

对于宽幅组合梁斜拉桥而言,由于已安装钢主梁在外力扭矩作用下发生了内倾,这种内倾变形在散件拼装过程中对横梁的安装较为不利,因此需要通过理论与现场结合加以分析。

目前可采取的方法是先在吊机作用下先匹配横梁一端的冲钉,由于匹配端的内倾会导致横梁未连接一端整体趋势向下,此时再在待安装横梁处安装七字板,将千斤顶放置在钢主梁上为横梁待匹配段提供一个向上的提升力。其原理公式为 $M = F \cdot L$ ,其中 $M$ 为横梁因顶升产生的最大弯矩, $F$ 为千斤顶的顶升力, $L$ 为横梁的长度。

因该主梁的横梁长度接近30 m,千斤顶提供的顶升力会产生较大弯矩使横梁发生弯曲变形,当顶升力达到某一范围时,对横梁产生的弯矩使横梁的转角变形趋近钢主梁的内倾变形,此时可以快速打入冲钉进行匹配。

还有一种方法是在钢主梁安装阶段,利用冲钉与螺栓孔间隙适当调整新安装钢主梁内外腹板高差,这种方法不会使钢主梁产生附加内力,但调整范

围相对有限。

### 3.2 高程控制

在钢梁安装时理论上采用计算定位标高进行连接,钢主梁的标高控制点如图 19 所示。但是施工过程中钢梁的实际标高可能会偏离理论值,此时如继续按计算值进行定位会导致钢梁线形产生过大折角,需进行修正。

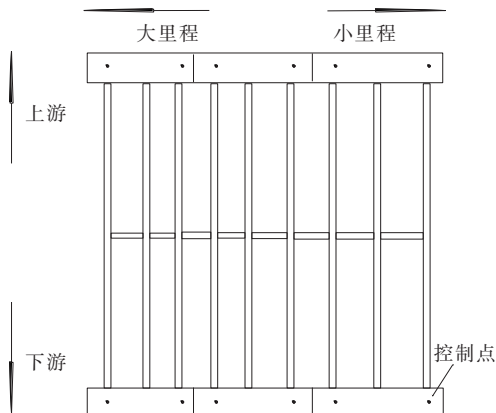


图 19 标高控制点

具体修正思路如下:

在图 20 所示的梁段误差中,假设主梁  $n+1$  安装定位时, $n-1$ 、 $n$  节段的实际标高误差为  $d_{n-1}$ 、 $d_n$ 。为保证主梁安装过程中线形的平顺性要求, $n+1$  梁段施工定位标高误差  $d_{n+1}$  (不考虑焊缝收缩等影响因素)有以下表达式:

$$d_{n+1} = \frac{d_n - d_{n-1}}{L_n} L_{n+1} + d_n \quad (2)$$

式中: $L_{n+1}$ 、 $L_n$  分别为  $n+1$  和  $n$  节段的梁长。

外界环境条件同样会影响梁段整体标高,温度场稳定时通过测量实际温度,将温度误差代入计算软件可求得修正量。当日照等影响安装定位标高时,目前尚无法精确计算其影响产生的变形量,但可采用局部定位法。如果前一梁段标高比较精准,则可以采用与前一梁段的相对位置进行定位,从而尽可能规避不稳定温度场带来的标高误差。

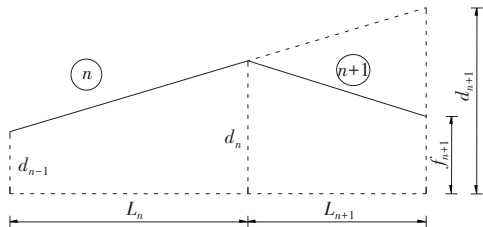


图 20 定位示意图

### 3.3 轴偏控制

钢主梁受各种因素的影响在桥位现场散件拼装过程中可能会发生一定程度的轴偏误差。如果不及时加以控制,随着悬臂施工梁段架设的进行,这种轴偏误差将会被成比例地放大,给施工及成桥状态带来较大的不利影响。所以在安装定位过程中需要及时对单根钢主梁的轴偏进行测量并加以调整。

现场具体控制方法为采用小型千斤顶在钢主梁顶板处进行顶推,利用螺栓孔与冲钉之间的间隙进行适当调整。若钢主梁轴线偏上游时,在上游腹板处进行顶推,轴线偏下游时则相反。轴偏调整到位后,采用多块码板焊接固定进行偏距的控制。

### 3.4 控制成果

该组合梁斜拉桥在塔区处通过顶推方式进行主动合龙,这种合龙方式不受外界条件的影响,可操作性强。合龙后在温度场稳定、无日照影响的环境下对全桥线形进行通测得到成桥线形。成桥线形整体平顺、光滑且不存在过大夹角,实测线形贴合于理论线形。全桥各高程测点实测值与理论值的平均差值为 8 mm,差值范围为  $-173 \sim 109$  mm,各节段高程控制效果较好,符合相关规范要求。可见主梁安装施工控制效果较好,成桥线形达到理想目标。

## 4 结论

针对组合梁钢主梁安装误差控制问题,对施工过程中钢主梁安装方法及安装误差进行详细分析,并提出相应的安装误差控制方法。通过有限元建模计算分析与相关方法的应用,得出以下结论:

(1) 格构式钢主梁安装方法的选用受结构受力、施工效率、施工精度和作业环境等因素的影响,应当综合考虑影响因素后进行安装方法的选择。本文所研究的桥梁若采用整体节段吊装,在吊机前支点反力作用于桥面板时会造成混凝土桥面板开裂,且钢梁的实际应力超过容许压应力。所以钢梁安装采用散件悬臂拼装形式,此时被起吊钢主梁变形不超过 1 mm,且受力满足要求,在桥面吊机和自重作用下可视为无应力线形。



(2) 钢梁安装过程可能会造成扭转误差、梁长误差及夹角误差等,特别是采用小冲钉时可能会造成梁段之间的过大夹角误差,因此对于小冲钉的使用频率应加以控制,防止造成夹角误差的叠加。

(3) 根据施工过程中的精度控制要求,本文所提出的主梁扭转、轴偏、标高等误差的调整控制措施有效便捷,能够确保钢主梁顺利安装。

#### 参考文献:

- [1] 谭文鹏,赵伟,敖登榜,等.山区钢混组合梁斜拉桥创新施工技术[J].公路,2022,67(2):138-143.
- [2] 陈亮,张龙,卢江波,等.基于梁格法的组合梁斜拉桥力学性能研究[J].湖南交通科技,2021,47(1):99-102.
- [3] 刘双,聂玉东,张铭,等.钢-混组合梁斜拉桥现浇混凝土桥面板关键设计技术研究[J].公路,2020,65(7):359-363.
- [4] 黄辉,邱攀,幸思佳,等.摩洛哥梭形塔钢混组合梁斜拉桥建造技术[Z].中铁大桥局集团有限公司,2020.
- [5] 郭健,朱敏俊,孙博,等.复杂格构式梁体三分力系数精细化计算分析[J].中国公路学报,2019,32(5):80-87.
- [6] 张东.格构式混凝土梁的施工及其现浇支架的设计[J].四川水泥,2022(10):147-149.
- [7] 林建茂,欧智菁,林上顺,等.钢管混凝土格构式梁桥设计参数抗震研究[J].福建工程学院学报,2017,15(6):549-554.
- [8] 侯新宇.格构式钢骨-钢管混凝土构件轴压性能及承载力计算方法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
- [9] 吕建锋.港珠澳大桥九洲航道桥组合梁钢主梁制作关键技术[J].施工技术(中英文),2021,50(23):28-31.
- [10] 刘治国.港珠澳大桥组合梁钢主梁大节段制作关键技术研究[J].施工技术,2017,46(22):33-36.
- [11] 徐亮,王辉平,张胜利,等.舟山西堠门跨海大桥分体式钢箱梁制造预拼装线形控制技术[J].中国工程科学,2010,12(7):43-46.
- [12] 颜东煌,陈常松,董道福,等.大跨度钢主梁斜拉桥的自适应无应力构形控制[J].中国公路学报,2012,25(1):55-58,82.
- [13] 涂光亚,石洋,邹磊.大跨度钢混组合梁斜拉桥钢主梁截面参数对成桥状态主梁受力敏感性分析[J].中外公路,2022,42(1):108-115.
- [14] 吴炜,孙东超,颜爱华.结合双主梁斜拉桥节段拼装与构件拼装比较[J].世界桥梁,2011,39(1):20-23.
- [15] 洪丽娟,周仙通,郭杰鑫,等.组合梁斜拉桥主梁双节段循环安装施工技术[J].世界桥梁,2013,41(5):44-47.
- [16] 董道福.超大跨径混合梁斜拉桥上部结构安装误差分析与控制[D].长沙:长沙理工大学,2011.
- [17] 张玉平,徐先鹏,李香梅,等.混合式组合梁斜拉桥参数分析与施工控制[J].中外公路,2022,42(3):85-92.
- [18] 张建民,肖汝诚.千米级斜拉桥施工过程中主梁的预转折角研究[J].计算力学学报,2005,22(5):618-622.
- [19] ZHANG Jinxiang, ZHANG Mingjin, JIANG Xulei, et al. Causes and control to lateral displacement of the main girder in the super-long-span cable-stayed bridge with transverse asymmetry dead load[J]. Structures, 2022, 37: 168-184.
- [20] 易云焜,岳青,严和仲.叠合梁斜拉桥主梁施工工序方案比选[J].公路,2012,57(12):36-38.
- [21] 梁全章.钢-混组合梁斜拉桥主梁整体吊装受力分析[J].工程建设,2018,50(8):39-44.
- [22] 秦顺全.桥梁施工控制:无应力状态法理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [23] 韩春秀.钢-混凝土组合梁徐变和收缩效应的理论与试验研究[D].昆明:昆明理工大学,2016.
- [24] FABIO G M, GIUSEPPE L, ANTONINO R, et al. Construction sequence analysis of long-span cable-stayed bridges[J]. Engineering Structures, 2018, 174: 267-281.
- [25] 涂可瑜.组合梁斜拉桥主梁的实用分析方法[D].大连:大连理工大学,2019.