

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211104001

文章编号:1674-599X(2023)04-0080-08

引用格式:李湘龙,黄飞鸿,欧阳星,等.宽幅钢箱梁斜拉桥合龙技术与影响因素分析[J].交通科学与工程,2023,39(4):80-87.

Citation: LI Xianglong, HUANG Feihong, OUYANG Xing, et al. Closure technology of wide steel box girder cable-stayed bridge and analysis of influencing factors[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(4): 80-87.

## 宽幅钢箱梁斜拉桥合龙技术与影响因素分析

李湘龙,黄飞鸿,欧阳星,曾有艺,易壮鹏

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**为研究斜拉桥合龙时各因素对桥梁线形和应力变化的影响,分别以某宽幅斜拉桥边跨和主跨合龙为工程背景,并采用BDCMS软件,分别建立有限元模型,针对索力、温度和荷载等因素对合龙桥梁线形和应力的影响进行分析。研究表明:温度和荷载均对合龙桥梁线形和应力有较大的影响,但对索力变化的影响相对较小。通过对该桥边跨和主跨合龙参数的监测和分析,选取22点至第二天8点为合龙时间段及相应的合龙口宽度等现场因素对钢箱梁合龙段进行配切计算,该施工方案提高了该桥现场合龙的施工精度和质量,可为类似工程施工提供借鉴。

**关键词:**钢箱梁斜拉桥;敏感性分析;合龙技术;温度影响

中图分类号:U414

文献标志码:A

## Closure technology of wide steel box girder cable-stayed bridge and analysis of influencing factors

LI Xianglong, HUANG Feihong, OUYANG Xing, ZENG Youyi, YI Zhuangpeng

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

**Abstract:** To study the influence of various factors on the linear and stress changes of the cable-stayed bridge during closing, taking the closure construction of side span and main span of a wide cable-stayed bridge as the engineering background, the finite element models were established by using the BDCMS software. The influence of cable force, temperature and load on the linearity and stress of the closed bridge is analyzed. The results show that, both temperature and load have a great influence on the linearity and stress of the closed bridge, however the influence on the change of cable force is relatively small. The closure parameters of the side span and main span of the bridge were monitored and analyzed. It can be seen that it is advisable to select 22 o'clock to 8 o'clock on the next day as the closing time and the corresponding closing width. The construction accuracy and quality of the bridge can be improved by using this construction scheme, which can provide reference for similar engineering construction.

**Key words:** steel box girder cable-stayed bridge; sensitivity analysis; closing technology; temperature effect

斜拉桥是一种高次超静定的组合结构,因其具有整体刚度大、抗风性能优良、跨越能力强、结构布置多样等优势,已经成为发展最快、最具有竞争力的桥型之一<sup>[1]</sup>。在桥梁建设的过程中,桥梁合龙是非常关键的一环。在实际施工中,桥梁合龙施工控

制尤为重要。因此,斜拉桥合龙控制和影响因素是斜拉桥施工控制研究的关键。许多学者针对斜拉桥在不同桥型、不同环境下的合龙技术和成桥敏感性进行了研究。何祖发等<sup>[2-4]</sup>对斜拉桥合龙施工控制技术和成桥状态时的钢箱梁和拉索弹性模量、重

收稿时间:2021-11-04

作者简介:李湘龙(1997—),男,长沙理工大学硕士生。

量等参数进行主梁线形的敏感性研究。但关于桥梁合龙前各种工况对桥梁线形的敏感性研究相对较少。而在桥梁在合龙施工时的整体温度、钢箱梁顶板底板温差、索力、施工荷载的变化都会对合龙口产生影响<sup>[5-6]</sup>。分析斜拉桥在悬臂状态下各因素对桥梁线形和应力影响的敏感性也是十分必要的<sup>[7-9]</sup>。因此,本研究以某宽幅斜拉桥合龙施工为工程背景,分析温差、索力、施工荷载等因素对合龙桥梁线形和应力的影响,并提出最佳的合龙时间段,以为类似工程施工提供参考与借鉴。

### 1 工程背景与合龙工序

以某跨径组合为33+102+183 m的独塔双索面混合梁斜拉桥为工程背景,该桥的钢砼结合点设置在跨径102 m的边跨处。该桥共23片钢箱梁,其中有20片需吊装,分别为南侧EJ1~EJ13与JH、北侧EA1~EAS与AH,边跨和中跨吊装合龙段分别为AH段和JH段,剩余3片钢箱梁AB、E0、JB段均为现拼段。斜拉索在主塔两侧分别有13对索,共52根。南侧编号为J1~J13;北侧编号为A1~A13。该桥布置如图1所示。主桥梁宽44.5 m,高4.0 m,主梁采用流线型扁平箱梁。钢箱梁标准横断面如图2所示。

现场监控点设置在外、内腹板和中心位置,标号为T1~T5。塔柱为钢筋混凝土构件。全桥采用半漂浮体系。

合龙是全桥施工过程中最关键的环节,其合龙效果将直接影响成桥线形和内力状态是否能达到设计要求,是整个施工控制的关键。目前,国内的桥梁合龙施工方法主要有两种:①顶推合龙施工方法,即在合龙之前,对主梁进行整体的顶推来调节合龙口的宽度。该方法不用改变合龙段的尺寸大小,但在主梁顶推前,需要提前释放塔梁临时约束,且结构体系转换之后不易恢复<sup>[10]</sup>。该方法应用在武汉二七长江大桥、洪山庙大桥等桥梁中<sup>[11]</sup>。②温度配切施工方法,即在桥梁合龙前,测量实际合龙口宽度,现场配切合龙段。该方法可避免释放塔梁临时锚固的风险,但其受环境温度影响较大,故要严格控制施工温度<sup>[12]</sup>。此方法应用在南京长江第三大桥中<sup>[13]</sup>。该桥的边跨和中跨的合龙均采用温度配切法,边跨合龙采用双边悬臂,同时吊装EJ6与边跨合龙段AH,主跨合龙则单边吊装EJ13,在现场进行配切施工。通过温度检测分析、合龙口线形调整与施工荷载的研究,主梁可处于无应力状态,实现桥梁的精准合龙。

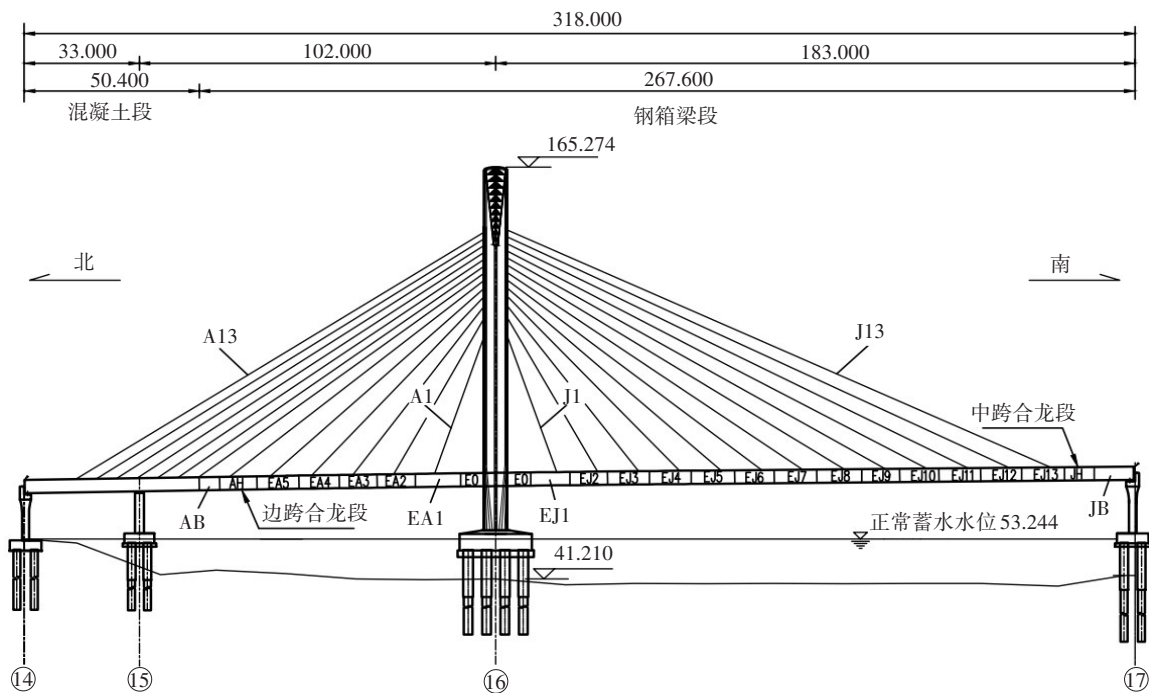


图1 主桥立面布置(单位:m)

Fig. 1 Elevation of the main bridge(unit:m)

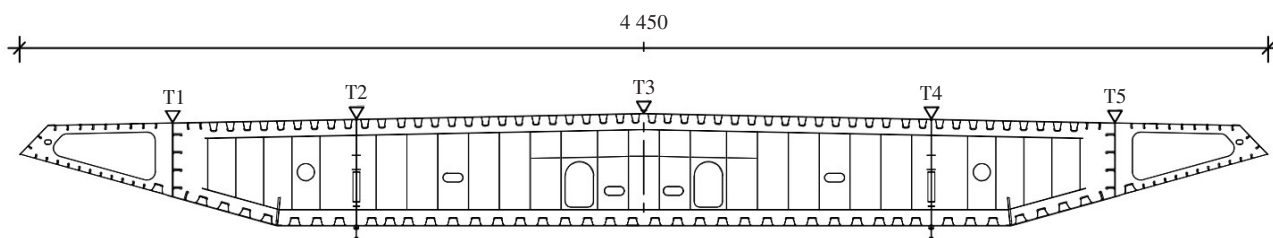


图2 主桥钢箱梁横断面(单位:m)

Fig. 2 Steel box girder cross section of the main bridge(unit:m)

## 2 合龙过程关键的因素影响分析

本研究采用BDCMS软件建立有限元模型<sup>[14]</sup>,模型网格划分为365个单元、300个节点。

### 2.1 斜拉索索力的影响分析

钢箱梁斜拉桥在未成桥之前,主梁的纵向刚度较小。此时在悬臂状态下斜拉索索力对主梁线形的影响较大。拉索前的计算需要考虑实际的工况,所建立的模型也需要考虑实际现场所产生的临时荷载。监测索力数值所用仪器为动测仪,根据斜拉索震动频率和索力系数 $K$ 来计算相应索力。在合龙前,控制合龙口标高与索力最为关键。因此,在BDCMS软件中添加不同工况,研究合龙前二次张拉最边缘一对索力的变化对标高抬升、下沉的影响和由此产生的主梁应力大小,计算结果见表1和图3。

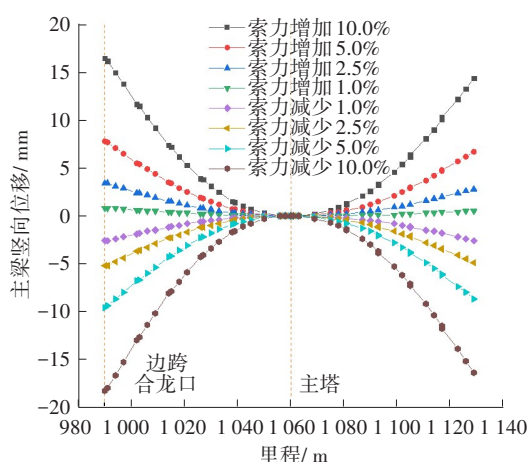
表1 斜拉索索力变化时的主梁应变变化值

Table 1 Stress change value of main girder induced by the change of the cable force MPa

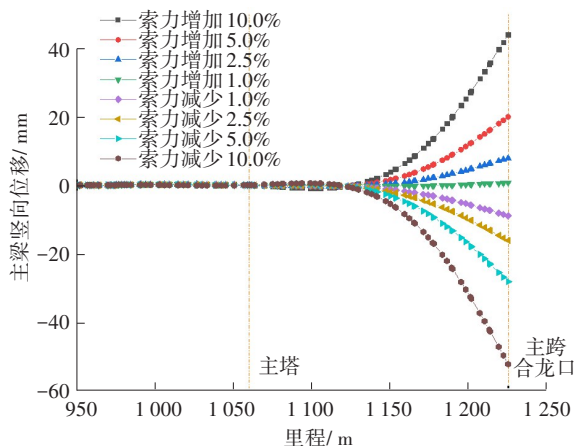
索力	边跨主梁应力		主跨主梁应力	
	上缘	下缘	上缘	下缘
二张索力+5%	-1.4 ~ 1.8	-1.3 ~ 1.8	-1.5 ~ 1.9	-1.5 ~ 1.9
二张索力-5%	-2.2 ~ 1.7	-2.2 ~ 1.7	-2.5 ~ 2.0	-2.5 ~ 1.9
二张索力+10%	-2.9 ~ 3.7	-2.8 ~ 3.7	-3.2 ~ 4.2	-3.2 ~ 4.2
二张索力-10%	-4.1 ~ 3.2	-4.2 ~ 3.2	-4.8 ~ 3.7	-4.8 ~ 3.6

在边跨合龙中,由表1和图3(a)可知,在二次张拉索力出现 $\pm 10\%$ 变化时,主梁应力的最大变化值达到了4.2 MPa,变化幅度为50%;当二张索力出现 $\pm 5\%$ 变化时,主梁应力的最大变化值为2.2 MPa,变化幅度为21.6%。同时二张索力对合龙口的线形影响也较大,当索力出现 $\pm 5\%$ 变化时,主梁合龙口

竖向位移最大差值为9.6 mm;当二张索力出现 $\pm 10\%$ 变化时,主梁合龙口的竖向位移最大差值为18.3 mm<sup>[15]</sup>。



(a) 边跨索力变化



(b) 主跨索力变化

图3 索力变化影响

Fig. 3 Diagram of cable force variation

在主跨合龙中,由表1和图3(b)可知,在二次张拉索力出现 $\pm 10\%$ 变化时,主梁应力的最大变化值达到了4.8 MPa,变化幅度为18%;当二张索力出现 $\pm 5\%$ 变化时,主梁应力的最大变化值为2.5 MPa,变化幅度为11.7%。从图3还可以看出,主跨合龙时对索力变化更为敏感,变化幅度也更

大。当索力出现±5%变化时,主梁合龙口竖向位移最大差值为28.3 mm;当二张索力出现±10%变化时,主梁合龙口的竖向位移最大差值为52.5 mm。在合龙前最大悬臂状态下,钢箱梁上、下缘应力在索力变化下基本保持一致。

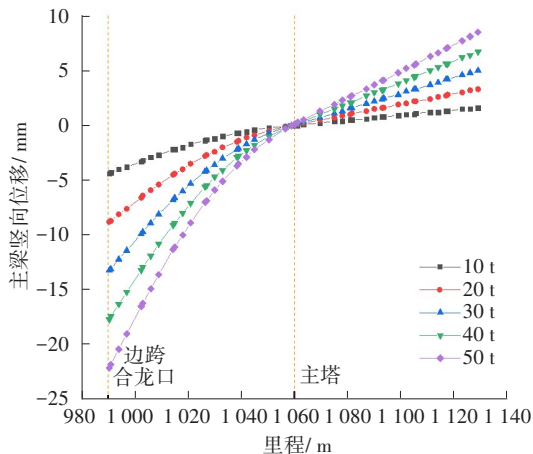
### 2.2 主梁临时荷载/配重的影响分析

施工过程中,主梁临时荷载主要包括桥面吊机、施工建材、主梁维修小车及相关设备等。在桥梁合龙过程中,临时荷载变化较大会对合龙口线形产生影响。故选取临时荷载或者现场配重参数来模拟实际施工工况的桥面吊机荷载误差、现场临时荷载的偏差及配重对合龙口线形的影响。计算前,将荷载重量模拟加载在中间T3位置,在其余参数数据不改变的情况下,通过BDCMS有限元软件计算出在最大悬臂状态时主梁的线形及应力变化。有限元计算结果见表2和如图4所示。

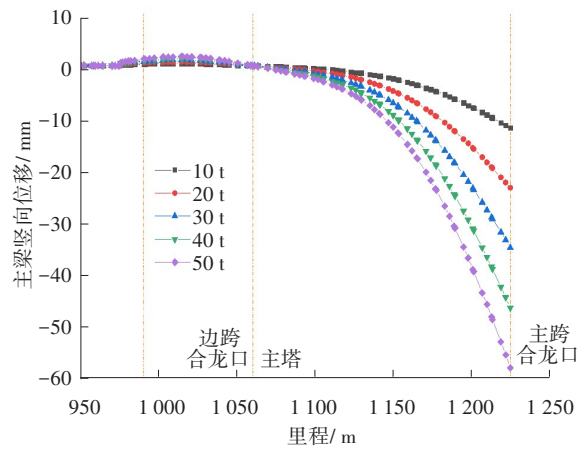
表2 荷载变化下的主梁应力变化值

Table 2 Stress change value of the main girder induced by the change of the load

荷载	边跨主梁应力的变化		主跨主梁应力的变化	
	上缘	下缘	上缘	下缘
荷载+10 t	-0.7 ~ 0.5	-0.7 ~ 0.5	-0.9 ~ 0.5	-0.9 ~ 0.5
荷载+20 t	-1.4 ~ 0.9	-1.4 ~ 0.9	-1.8 ~ 1.1	-1.8 ~ 1.1
荷载+30 t	-2.1 ~ 1.3	-2.1 ~ 1.3	-2.7 ~ 1.6	-2.7 ~ 1.6
荷载+40 t	-2.8 ~ 1.8	-2.8 ~ 1.7	-3.6 ~ 2.1	-3.6 ~ 2.1
荷载+50 t	-3.4 ~ 2.2	-3.4 ~ 2.2	-4.5 ~ 2.6	-4.5 ~ 2.6



(a) 边跨荷载变化



(b) 主跨荷载变化

图4 荷载变化的影响

Fig. 4 Influence of load change

由表2和图4(a)可知,在边跨合龙中,临时荷载的变化对主梁应力的影响较小。当临时荷载增加到20 t时,主梁应力的最大变化值为1.4 MPa,变化幅度为24.6%;当荷载增加到50 t时,主梁应力的最大变化值为3.4 MPa,变化幅度最大为60%。但临时荷载对在最大悬臂状态下的合龙口标高影响较大,当临时荷载分别增加20 t和50 t时,主梁合龙口竖向位移分别达到8.8 mm和22.1 mm。

由表2和图4(b)可知,在主跨合龙中,临时荷载变化对应力的影响和边跨时一样,影响较小。当施工时临时荷载增加到20 t时,主梁应力的最大变化值为1.8 MPa,变化幅度为9%;当荷载增加到50 t时,主梁应力的最大变化值为4.5 MPa,变化幅度为22.7%。但在主跨合龙时,临时荷载对主梁线形的影响很大,在临时荷载增加20 t和50 t时,主梁合龙口竖向位移分别达到了23.6 mm和58.4 mm。由表2可知,该桥在理想状态下,在合龙前随着临时荷载的增加,上、下缘应力基本保持一致,且其均与荷载呈线性关系。

### 2.3 温度荷载的影响分析

若采用温度配切法进行合龙施工,虽然合龙速度快,但是施工受温度的影响也较大。因此,控制温度也是影响温度配切法合龙的重要一环<sup>[16]</sup>。

在斜拉桥施工中,均匀温度和梯度温度均会对合龙产生影响。在合龙段施工时,通常会选择在温度稳定的时间段进行。因此,合龙时的温度影响实际上主要是指均匀温度影响<sup>[17]</sup>。在钢箱梁合龙施工中,对现场施工影响最大的因素为温度影响,所以须确定最佳合龙温度,其步骤为:①要查询当地

同一时期的气象资料,预估现场合龙实际温度是否与模型计算时的温度相符。若不能达到,则要进行合龙温度修正计算,以确定实际的合龙温度,以及相应的温度调整措施。②在合龙前,进行24 h的温度观测,主要观测合龙口的温度场、合龙口两侧的高程及合龙口宽度,观测频率为每2 h进行一次,根据最终观测的结果来确定最佳合龙时间段<sup>[18]</sup>。

在合龙前要清理桥面上所有的临时荷载,确保合龙口处于无应力状态。合龙段前、后梁端在卸载、加载过程中,应尽量做到上、下游平衡,中边跨对称均衡。合龙完成后,立即观测合龙段两端高程,并确定是否需要调整预压重量及焊接合龙段刚性连接的时间。

### 2.3.1 边跨合龙

#### 1) 温度的影响分析。

在边跨起吊前,需要对其合龙口进行实时温度及合龙口宽度的实时监测。该桥位于广东省韶关市,边跨合龙时间于10月份。根据历年广东省韶关市10月气温报告可知,韶关市10月份的昼夜温差近10℃,温差较大,温度监控较为关键。研究边跨在起吊前的最大悬臂状态下,整体温度升降及上、下梁板每相差5、10℃时边跨标高的变化规律,可为类似工程的现场分析提供理论依据。

在经过实时监控后,大气温度、钢箱梁顶底板温度结果如图5所示。

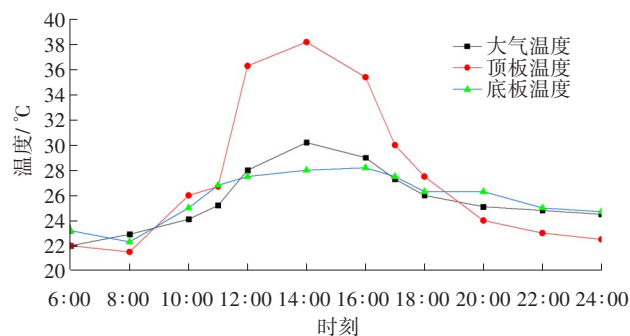


图5 边跨合龙前温度变化

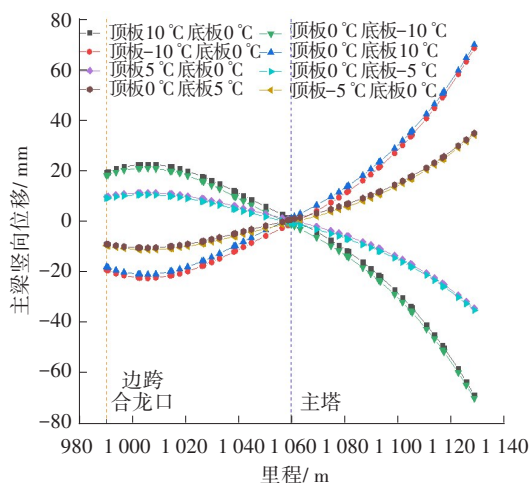
Fig. 5 Temperature change before side span closure

温度分析主要包含整体温度分析和温差分析两个方面。通过有限元模拟计算,其结果如图6所示。从图6(b)可以看出,升温时,钢箱梁整体呈上凸的趋势,在主梁悬臂处边跨合龙口(即EA5)和EJ5处,钢箱梁呈现下弯趋势。温差越大,标高变化起伏也越大,并且温差引起的标高变化近似于线性关系。

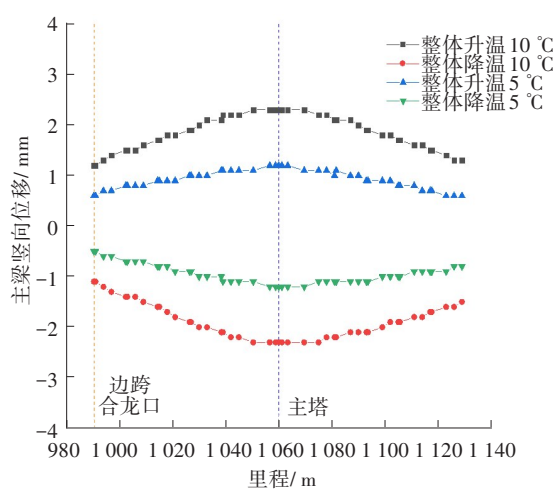
针对钢箱梁温差分析,采用了这两种温差。从

图6(a)可以看出,只要温差一致,无论处于何种温度,其对应的标高变化曲线基本一致,如:顶板10℃、底板0℃和顶板0℃、底板-10℃这两种情况。主梁边跨合龙口和EJ5两个悬臂端变化幅度相差较大,其主要原因是在里程1 038 m至1 060 m处受临时支座的影响,故边跨处的标高变化比主跨处的小。

从图6(a)和(b)还可以看出,在边跨合龙过程中,与钢箱梁整体温度相比,钢箱梁顶、底板温差对合龙口标高的影响更大,所以选定合龙时间需要考虑钢箱梁顶、底板的温度差,保证温差尽可能小一些。从图5可以看出,22点至第二天8点,桥梁顶、底板温度均在24℃左右,温差较小,与理论模型分析中的25℃较接近,该时间是合龙较适合的时间段。



(a) 顶底板温差影响



(b) 顶底板温差影响

图6 边跨合龙温度变化影响

Fig. 6 Influence of temperature change of side span closure

2) 合龙长度的确定。

在测量合龙段24h的温度和合龙段长度时,由于合龙段宽度较小,采用钢卷尺进行长度测量。但该桥为双向8车道,横向宽度较大,故测量过程中横向测点布置较密。现场在合龙段两侧同时测量合龙口两边梁顶底板的T2~T4,共12个测点,选取合龙口长度,监测L1~L6,测点布置如图7所示,每隔2h测量一次长度。

合龙段无应力制造长度的计算式为:

$$L_x = L_c - L_t - L_h - L_z - L_g \quad (1)$$

式中: $L_x$ 为无应力制造长度; $L_c$ 为测量长度; $L_t$ 为温度影响量(若实际合龙温度大于基准温度,则取正值;反之,则取负值); $L_h$ 为焊缝宽度,预留给施工方的宽度为20mm; $L_z$ 为合龙口两侧的钢箱梁高差产生的转角误差值; $L_g$ 为高差修正量<sup>[19]</sup>。

经过对比分析,选取上午6点的数据,通过计算,顶底板上、下游合龙长度L1~L6分别为9933、9915、9915、9989、9976和9962mm。

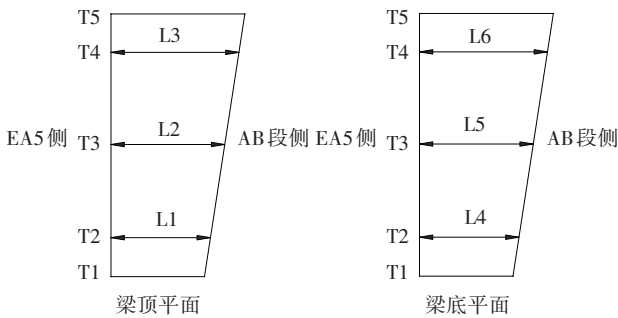


图7 边跨AH合龙段测量点布置

Fig. 7 Layout of measuring points in AH closure section of side span

2.3.2 中跨合龙

1) 温度分析。

该桥中跨合龙采取的工艺为温度配切合龙法,与边跨合龙一致。在合龙前24h,每隔2h测量一次温度,测量结果如图8所示。由于合龙时间为12月,温度变化相对不大,但合龙时,中跨在最大悬臂状态下对温度的敏感性应比其在边跨合龙时的更高,故应做好理论计算,确保现场精准合龙。

与边跨合龙相似,计算整体和顶、底板温差,结果如图9所示。从图9(b)和图6(b)可以看出,在整体温差分析中,随着悬臂端的生长,中跨合龙时主梁的线形变化受整体温度变化的影响更明显。当整体温度变化幅度为±10℃时,合龙口位移最大达到了21.1mm、整体温度变化幅度为±5℃时,合龙口位移最大达到了10.7mm。从图9(a)可以看出,当主梁上、

下板温差达到10℃时,线形影响较大,最大竖向位移达到47.8mm,故在中跨合龙中,同样要尽量选择顶底板温差较小的时间段。对比图8可知,15:00至19:00为相对较好的合龙时间段。

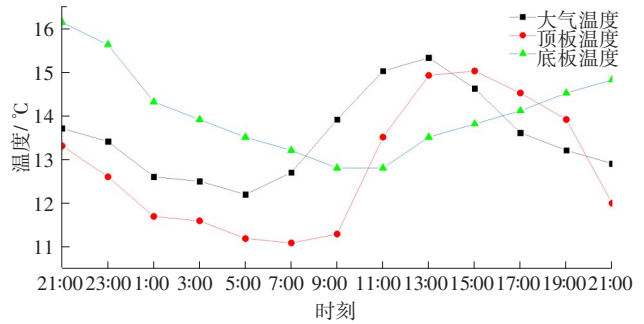
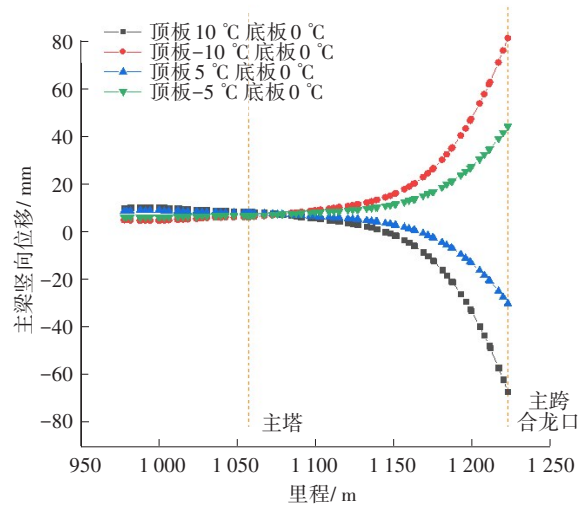
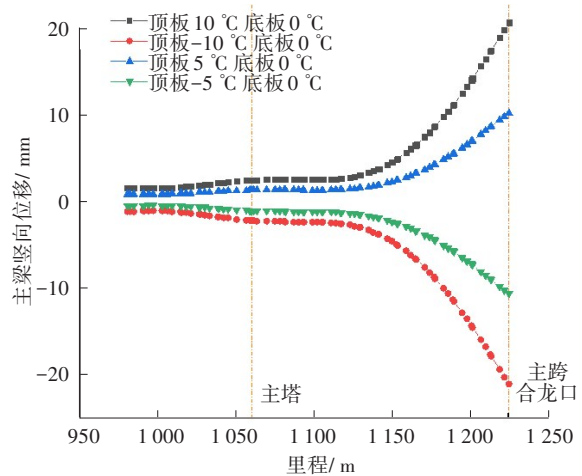


图8 中跨合龙前温度变化

Fig. 8 Temperature change before middle span closure



(a) 顶底板温差影响



(b) 整体温度变化影响

图9 主跨合龙温度变化影响

Fig. 9 Influence of temperature change of middle span closure

## 2) 合龙长度确定。

中跨合龙段设计长度为7 m,跨径较小,所以采用钢卷尺来进行合龙前的合龙口宽度测量。由于此桥为宽幅桥,且与边跨合龙相比,中跨合龙对温度、荷载、索力等因素的敏感性更高,为保证桥梁顺利合龙,宽度测量点的线路增加了4条(顶、底板各2条路径),测量点及布置如图10所示。采用式(1)计算合龙长度。

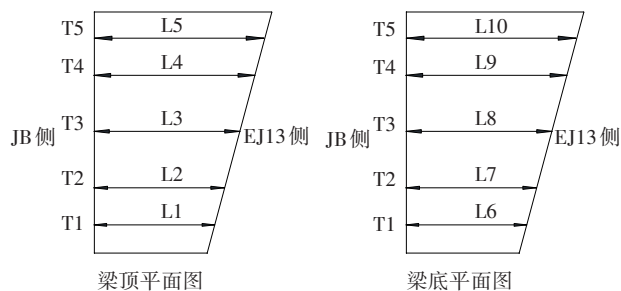


图10 中跨JH合龙段测量点布置

Fig. 10 Layout of measuring points in JH closure section of middle span

以计算L1为例: $L_c$ 测量长度为7 070 mm,经过计算, $L_t$ 受温度影响量为15 mm(实际合龙温度低于基准温度), $L_h$ 焊缝宽度和边跨时的相同,均为20 mm,转角误差值 $L_e$ 和高差修正量 $L_g$ 分别为6、3 mm。由式(1)可得,L1为7 026 mm

### 3 结论

本研究以一座宽幅独塔钢箱梁斜拉桥边跨和中跨合龙施工过程为背景,分析施工合龙工序,并研究温度、临时荷载和索力对合龙口的影响,得到以下结论:

1) 在合龙时,温度对主梁线形影响较大,属于主要敏感参数。其中,顶底板温差的影响要明显大于整体温度变化的影响,故在钢箱梁桥合龙施工控制中,要着重注意顶底板的温差。

2) 在合龙时,临时荷载和对主梁线形的影响也为主要敏感参数。在理想条件下,主梁增加的应力和荷载呈线性关系。

3) 索力与温度和荷载相比,对主梁线形的影响相对较小,属于较敏感参数。在索力调整变化时,上、下缘应力变化基本一致。

#### 参考文献(References):

[1] 戴杰,秦凤江,狄谨,等.斜拉桥成桥索力优化方法研

究综述[J].中国公路学报,2019,32(5):17-37. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.05.002.

DAI Jie, QIN Fengjiang, DI Jin, et al. Review on cable force optimization method for cable-stayed bridge in completed bridge state [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 17-37. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.05.002.

[2] 何祖发,钟继卫.独柱斜塔混合梁斜拉桥施工控制[J].桥梁建设,2009,39(3):67-70.

HE Zufu, ZHONG Jiwei. Construction control of hybrid girder cable-stayed bridge with a single column inclined pylon[J]. Bridge Construction, 2009, 39(3): 67-70.

[3] 熊树章.钢混叠合梁斜拉桥结构参数敏感性分析[J].中外公路,2016,36(1):159-162. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2016.01.035.

XIONG Shuzhang. Sensitivity analysis of structural parameters of steel-concrete composite beam cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(1): 159-162. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2016.01.035.

[4] 张丰,颜东煌,陈常松.大跨度组合梁斜拉桥成桥状态参数敏感性分析[J].交通科学与工程,2021,37(2):91-97. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.014.

ZHANG Feng, YAN Donghuang, CHEN Changsong. Parameter sensitivity analysis of the long-span composite girder cable-stayed bridge in the finished bridge state[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 91-97. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.014.

[5] 李伟.独塔混合梁斜拉桥施工及运营阶段温度影响分析[J].中外公路,2020,40(6):166-170. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.06.035.

LI Wei. Analysis of temperature effect on cable-stayed bridge with single tower and hybrid girders during construction and service periods[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(6): 166-170. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.06.035.

[6] 张玉平,刘雪松,李传习.基于MOPSO算法的双塔斜拉桥合理状态确定[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(2):22-27,35. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.02.005.

ZHANG Yuping, LIU Xuesong, LI Chuanxi. Determining the reasonable state of cable-stayed bridges with twin towers based on multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science),

- 2019, 16(2): 22-27, 35. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.02.005.
- [7] 秦文彬. 钢箱梁斜拉桥参数敏感性及施工关键技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020. DOI: 10.27275/d.cnki.gsdku.2020.001676.
- QIN Wenbin. Study on parameter sensitivity and construction key technology of steel box girder cable-stayed bridge [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020. DOI: 10.27275/d.cnki.gsdku.2020.001676.
- [8] 岳青, 严和仲, 阙水杰, 等. 大跨度钢箱梁斜拉桥施工控制[J]. 桥梁建设, 2013, 43(4): 54-60.
- YUE Qing, YAN Hezhong, QUE Shuijie, et al. Construction control of long span steel box girder cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2013, 43(4): 54-60.
- [9] 王显鹤. 大跨度钢箱梁斜拉桥的施工控制探究[J]. 城市建筑, 2020, 17(33): 174-176. DOI: 10.19892/j.cnki.csjz.2020.33.50.
- WANG Xianhe. Exploration on the construction control of long span steel box girder cable-stayed bridge [J]. Urbanism and Architecture, 2020, 17(33): 174-176. DOI: 10.19892/j.cnki.csjz.2020.33.50.
- [10] 陶路, 曾德礼. 大跨度钢箱梁斜拉桥中跨合龙关键技术[J]. 铁道建筑, 2020, 60(1): 19-22. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2020.01.05.
- TAO Lu, ZENG Deli. Key technology of medium span closure for long-span steel box girder cable-stayed bridge [J]. Railway Engineering, 2020, 60(1): 19-22. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2020.01.05.
- [11] 易云焜, 谢泽福, 牛海喜. 厦漳跨海大桥南汉主桥定时合龙技术[J]. 桥梁建设, 2013, 43(2): 105-109.
- YI Yunkun, XIE Zefu, NIU Haixi. Technique of fixed time closure for main bridge of south bridge of Xiazhang sea-crossing bridge [J]. Bridge Construction, 2013, 43(2): 105-109.
- [12] 赵春斌. 铁路混合梁斜拉桥配切合龙技术研究与实践[J]. 安徽建筑, 2019, 26(5): 91-94. DOI: 10.16330/j.cnki.1007-7359.2019.05.034.
- ZHAO Chunbin. Research and practice on alignment technology of railway hybrid beam cable-stayed bridge [J]. Anhui Architecture, 2019, 26(5): 91-94. DOI: 10.16330/j.cnki.1007-7359.2019.05.034.
- [13] 李宗平. 南京长江第三大桥钢箱梁安装技术[J]. 施工技术, 2008, 37(5): 111-114.
- LI Zongping. Installation technology for steel box-girder of Nanjing No.3 Yangze River Bridge [J]. Construction Technology, 2008, 37(5): 111-114.
- [14] 杨智文. 独塔混合梁斜拉桥施工控制理论分析与控制系统布置[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2020.000070.
- YANG Zhiwen. Analysis of construction control theory and arrangement of construction control system for single-tower hybrid girder cable-stayed bridge [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2020.000070.
- [15] 张宪堂, 余辉, 秦文彬, 等. 钢箱梁斜拉桥结构参数敏感性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 41-47, 55. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2020.05.005.
- ZHANG Xiantang, YU Hui, QIN Wenbin, et al. Sensitivity analysis of structural parameters of steel box girder cable-stayed bridge [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(5): 41-47, 55. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2020.05.005.
- [16] 卢勇, 杨培诚. 混合梁斜拉桥中跨加载合龙施工技术[J]. 中国港湾建设, 2013, 33(2): 60-64. DOI: 10.7640/zggwjs201302015.
- LU Yong, YANG Peicheng. Construction technology for closure of mid-span girders of a hybrid girder cable-stayed bridge [J]. China Harbour Engineering, 2013, 33(2): 60-64. DOI: 10.7640/zggwjs201302015.
- [17] 涂光亚, 李辉, 李亮辉. 超大跨度混合梁斜拉桥中跨合龙温度影响及对策[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 61-64. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.01.013.
- TU Guangya, LI Hui, LI Lianghui. Temperature influence and countermeasure of mid-span closure of super long-span hybrid girder cable-stayed bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(1): 61-64. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.01.013.
- [18] 李佳莉, 张谢东, 刘英荣, 等. 灌河特大桥平行弦合龙控制技术[J]. 铁道建筑, 2017, 57(9): 64-67. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2017.09.15.
- LI Jiali, ZHANG Xiedong, LIU Yingqi, et al. Control technique in closure of parallel chords for guanhe river super-large bridge [J]. Railway Engineering, 2017, 57(9): 64-67. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2017.09.15.
- [19] 涂光亚, 颜东焯, 陈常松, 等. 荆岳长江公路大桥中跨合龙施工技术[J]. 桥梁建设, 2013, 43(4): 105-109.
- TU Guangya, YAN Donghuang, CHEN Changsong, et al. Construction techniques for closure of central span of Jingyue Changjiang River Highway Bridge [J]. Bridge Construction, 2013, 43(4): 105-109.

(责任编辑:欧兆虎;校对:罗容;英文编辑:陈璐)