

超宽钢箱梁纵横向分块安装局部相对变形分析

刘力^{1,2,3}, 彭成明^{1,2,3}, 罗航¹

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430000; 3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 北京市 100011)

摘要:为了满足巴拿马四桥施工期间不得占用航道的要求,针对中央双索面超宽超重钢箱梁(标准节段长13 m,宽51 m,重约370 t)的架设提出一种创新的施工方案,即钢箱梁采用纵向分段后再横向分两块,通过索塔侧向提梁上桥面,梁上运梁至悬臂端桥面吊机处,尾部喂梁前移并空中旋转90°,调整好姿态后再横向移梁进行匹配对位。为了了解横向分块后钢箱梁匹配时的变形情况,确定合理的对接工序,采用有限元软件对横向分块钢箱梁安装局部相对变形进行分析,并与整节段安装进行对比。研究表明:该方法存在明显横向偏载效应,中间起吊工况尤其明显,但横移匹配时,边腹板相对中腹板变形会明显减小,最大错缝高差4.2 mm;与整节段安装相比,横向分块会存在纵横向两个拼接面,其中横桥向拼接面变形较顺桥向变形大,故建议匹配完刚度较大的中腹板后,先匹配顺桥向拼接面,再匹配横桥向拼接面剩余区域,顺桥向拼接面匹配也按照优先匹配刚度大的横隔板,然后再匹配横隔板之间局部区域。总体来说,提出的横向分块方案局部相对变形在可控范围内,通过合理的匹配方式能够满足施工要求。

关键词:斜拉桥;宽幅钢箱梁;横向分块;有限元模型;局部变形

中图分类号:U445.4

文献标志码:A

0 引言

大跨径斜拉桥中,主跨多采用钢箱梁,悬臂拼装法是目前普遍采用的施工方法^[1-2],待安装梁段在悬吊状态下与已拼装梁段对接就位,由于待安装梁段与已安装梁段受力状态不同,拼接断面往往存在横向变形偏差。随着钢箱梁横向宽度变宽,这种局部匹配变形差越大,不仅匹配困难,还会产生较大的残余应力,影响结构疲劳寿命。目前中国对已建成的大跨钢箱梁斜拉桥匹配分析已有很多成果,典型的工程案例有南京长江二桥^[3]、苏通大桥^[4]、嘉绍大桥^[5-6]、港珠澳青州航道桥^[7]等。一般来说吊机作用梁段与起吊梁段变形方向相反,顶、底板负温差对变形的影响较小,建议在晚间进行钢箱梁匹配^[3]。目前主要有两种匹配工艺,即边腹板先对齐及中腹板先对齐,一般采用刚度大的中腹板对齐工艺^[1,4],这样接缝两侧梁段之间的变形差较小,方便现场调节。已安装梁段和待安装梁段匹配偏差

主要受拼接口横向相对变形的影响,而吊机作用梁段的变形远大于被起吊梁段,是引起相对变形的主要部分,故以往的研究重点是如何减小匹配时起吊梁段的横向相对变形。很多学者研究已安装梁段上的荷载对拼接口变形的影响程度,分析表明吊机前支点反力是引起梁段横向相对变形过大的最主要因素^[7]。故后续减小横向相对变形的思路主要为如何减少前支点反力。目前主要的做法是先从刚度大的地方对齐,然后通过吊机按比例卸载。总体来说,中国近年来大跨桥梁发展迅猛,整节段钢箱梁匹配分析已经十分成熟,部分研究成果已成功应用到实际工程中。但对于中跨钢箱梁横向分块架设鲜有研究。钢箱梁横向分块多应用在城市小跨径桥梁中^[8-9],目的是减轻整体起吊重量以及方便运输,由于起吊设备未作用在已安装梁段上,故拼接口错差不会太多,更多的是关注起吊梁段由于横向切割后,起吊长度过长引起的稳定性问题。故对于斜拉桥钢箱梁纵横向分块架设值得深入研究。

收稿日期:2021-10-20(修改稿)

基金项目:中国交通建设股份有限公司科技研发项目(编号:2019-ZJKJ-09)

作者简介:刘力,男,硕士,工程师.E-mail:erhangju_liuli@163.com

1 工程概况

巴拿马四桥为公轨两用混合梁斜拉桥,桥跨布置为 $(68+72+72+77+510+77+72+72+68)$ m。东岸基础为扩大基础,西岸基础为桩基础。主桥设计为双向六车道+双线轻轨,设计速度为110 km/h。通航净空高度75 m,通航净宽350.31 m。地震峰值加速度为 $0.367g$ (475年重现期)。钢混结合面距索塔中心32.5 m,巴拿马四桥立面布置图见图1。中跨钢箱梁段长445 m,共划分为19节段,其中标准节段16个,标准节段长13 m,截面全宽51 m,中心梁高

5.03 m,标准节段每节设置4道横隔板,隔板间距为3 m、3.5 m交替,合龙段长8.5 m。中央双索面布置斜拉索,索间桥面横向距离15.7 m,斜拉索中间设置巴拿马地铁3号线的轨道及设施。钢箱梁标准断面见图2。

巴拿马四桥横跨世界最繁忙航道——巴拿马运河,业主明确要求施工期间不得占用航道,故无法进行水上垂直起吊。同时主桥东岸为巴拿马主城区,交通拥挤且车流量大,道路超载限制严格。巴拿马四桥中跨钢箱梁标准节段长13 m,重约370 t,宽51 m,为典型的超宽超重结构,无条件进行整节段架设。

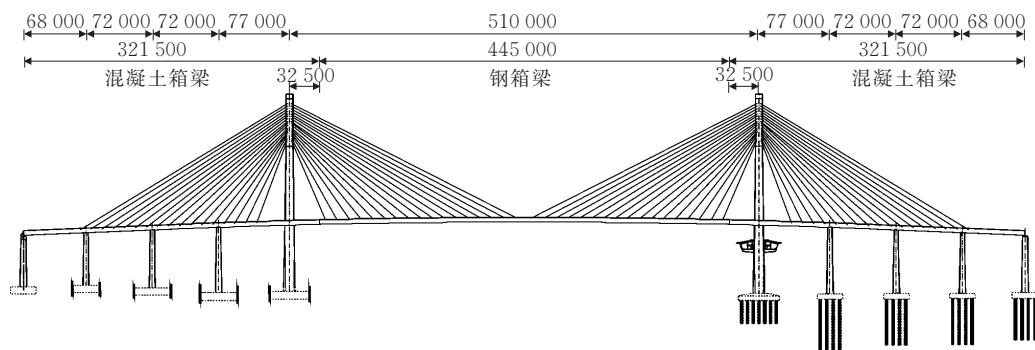


图1 巴拿马四桥立面布置图(单位:mm)

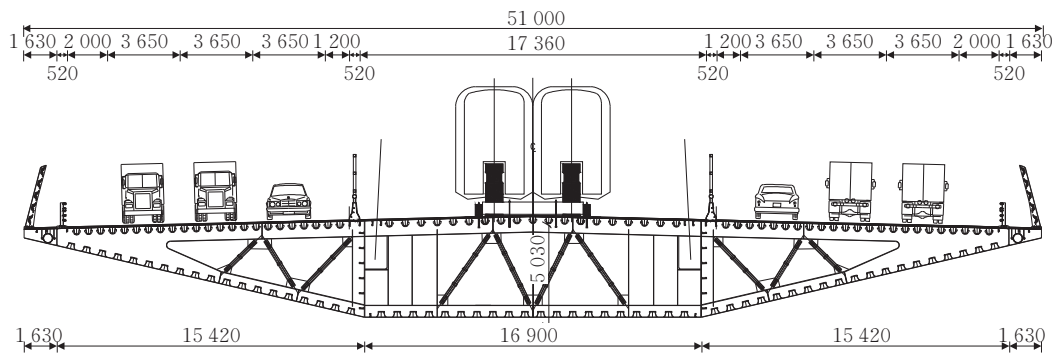


图2 钢箱梁标准断面图(单位:mm)

2 纵横向分块安装工艺及设备

为解决跨繁忙航道超宽超重钢箱梁架设问题,文中提出将钢箱梁节段横向对称分两块,再通过索塔侧面设置提梁桁吊将钢箱梁节段提升上桥面,采用运梁小车运至悬臂端,通过桥面吊机进行悬拼架设^[10-11]。根据钢箱梁分块尺寸和重量,结合索塔处空间位置,拟采用200 t的提梁桁吊。后锚点距索塔中

心线7.5 m,前后支、锚点间距14.5 m。顺桥向两侧支腿间距30.55 m,具体布置如图3所示。钢箱梁节段沿长度方向提升至桥面,不进行姿态调整,直接落在运梁小车上,纵向直线运输至悬臂端。在悬臂端对称布置两台桥面吊机,桥面吊机性能与侧面提梁桁吊一致,桥面吊机设计考虑了起吊旋转和移梁匹配两个工况。

节段钢箱梁通过悬臂端桥面吊机提梁、前移、旋转及对位,具体施工步骤如下:

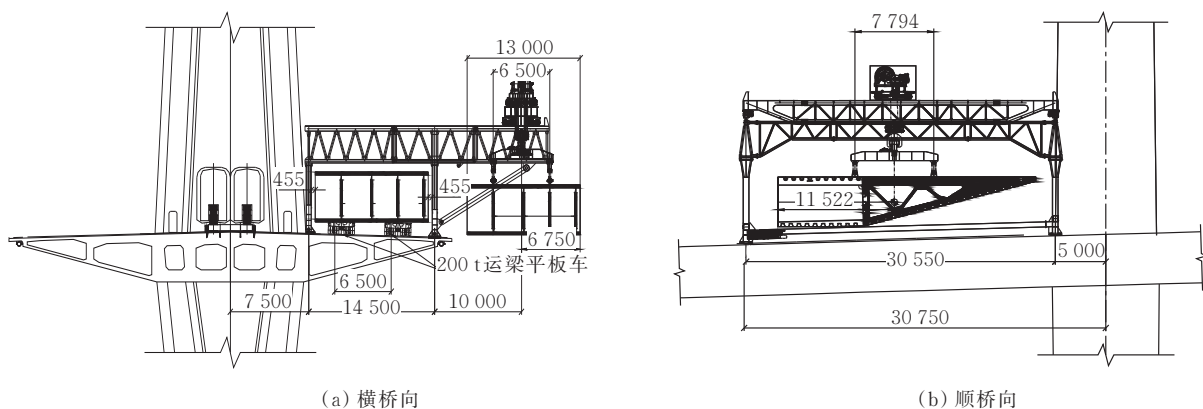


图 3 侧向提梁桁架总体布置图(单位:mm)

步骤 1: 节段钢箱梁通过塔侧提梁桁吊提升至桥面, 通过运梁小车将所要架设的梁段运至桥面吊机内指定位置, 连接桥面吊机吊具与钢箱梁吊耳, 准备提梁。

步骤 2: 吊具安装后, 通过天车走行机构将梁运至最前端, 幅度 13 m 处。适当降低悬吊高度到合适位置, 使其旋转过程中不会碰到桥面吊机本身结构, 具有足够的旋转空间。

步骤 3: 通过旋转吊具将梁段旋转 90° , 并通过起重小车横向移梁到匹配位置, 通过吊具可调丝杆调整钢箱梁姿态, 如图 4 所示。

步骤 4: 节段钢箱梁缓缓下放至匹配位置, 起升天车后移匹配对位, 落梁完毕后, 进行焊接工作。

步骤 5: 焊接工作完成后, 张拉对应斜拉索, 天车运行至桥面吊机尾端(16 m 处), 准备下一梁段的架设工作, 如此循环直至跨中合龙。

3 悬拼安装节段局部相对变形分析

3.1 有限元模型

采用大型通用有限元程序 Ansys 建立了标准节段的精细化板壳单元分析模型。几何模型严格按照实际结构的尺寸和板件的几何关系建立, 能较为精确地反映悬臂梁段与起吊梁段真实的受力及变形状况。全桥模型在建立过程中细化处理了横隔板、加劲肋、中腹板、边腹板的几何关系, 钢箱梁各构件均采用 Shell63 单元模拟, 既能确保仿真分析模型贴近结构的真实状况, 又能保证结构在网格划分时不出现歪扭、奇异单元^[4]。根据圣维南原理, 实际计算中选取悬臂前端 4 块标准梁段进行分析, 将梁段后端固结, 以减少后端约束对匹配端相对变形的影响^[1]。斜拉索一端与箱梁锚固, 另一端直接固结约束。起吊梁段直接在吊点位置进行固结处理, 吊点纵向布置在横隔板上, 横向根据梁段重心位置对称布置。

3.2 荷载及分析工况

悬臂梁段在施工过程中, 主要受到桥面吊机前支点反力、斜拉索拉力和梁体自重的作用。其中, 桥面吊机前支点反力主要包括桥面吊机自重引起的反力和起吊梁段引起的桥面吊机反力。通过集中力的方式反映在局部分析模型中。根据 Midas 杆系模型, 在施工阶段对应的斜拉索索力, 以集中荷载的方式施加在模型中。起吊梁段在悬拼起吊过程中, 主要

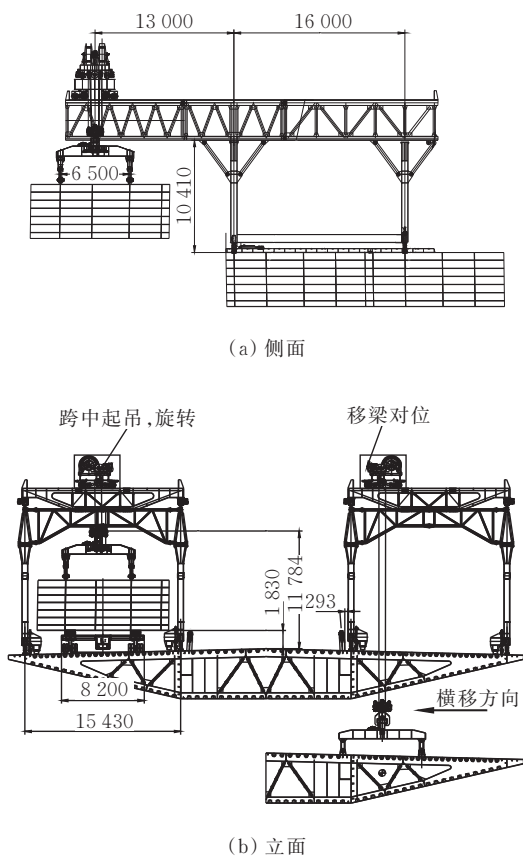


图 4 节段钢箱梁空中旋转横移匹配(单位:mm)

受到自重及吊臂拉力的作用。由于钢箱梁的安装调位多选在夜晚温差变化较小的时间,因此在横向变形分析时可假定钢箱梁顶、底板间温度接近,忽略钢箱梁横、纵、竖向的温度梯度影响。

计算工况如表1所示,横向分两块安装时,在跨中起吊、旋转工况,前支点及后锚点受力左右对称,其中前支点压力为2 990 kN,后锚点拉力为940 kN;在横移匹配对位工况,前支点及后锚点左右受力将不对称,按最不利偏载情况计算,前支点内侧压力为5 480 kN,外侧压力为50 kN,后锚点内侧拉力为1 720 kN,外侧拉力为160 kN。整节段安装时,前支点内外侧压力为5 980 kN,后锚点内外侧拉力为1 880 kN。

表1 计算工况

名称	计算工况	工况描述	匹配面
首半块	中间起吊	支点反力对称	—
分块	安装	横移匹配	内外侧支点反力不同
	安装	另半块	中间匹配
整节段安装	垂直起吊	支点反力对称	横向一个匹配面
	横移匹配	内外侧支点反力不同	纵、横向两个匹配面

3.3 计算结果分析

根据以往研究成果,先对齐刚度较大的中腹板,再在边腹板处调整接缝两侧相对变形的的方法,梁段匹配端变形平顺,残余变形小,更接近无应力匹配^[2]。本文也选用这种工艺进行研究,接缝两侧梁段以中腹板顶面为基准点对齐、固定。已安装梁段横移匹配时拼接面相对该基准点的相对变形如图5所示。

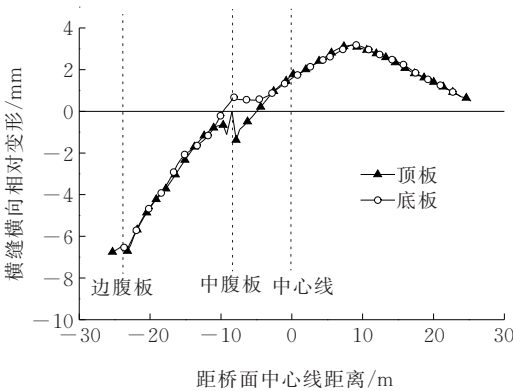


图5 横移匹配时已安装梁段横向相对变形情况

由图5可以看出:除桥面吊机作用局部区域外,顶、底板横向相对变形趋势基本一致,说明变形以弯

曲变形为主,畸变等扭转变形较小。顶板边腹板相对于中腹板下挠6.5 mm,未加载的另一边则会上翘。

起吊梁段横桥向拼接面相对于中腹板顶相对变形如图6所示,起吊梁段吊点沿纵向布置在横隔板处,横向按节段重心对称布置,其中内侧吊点靠近中腹板。

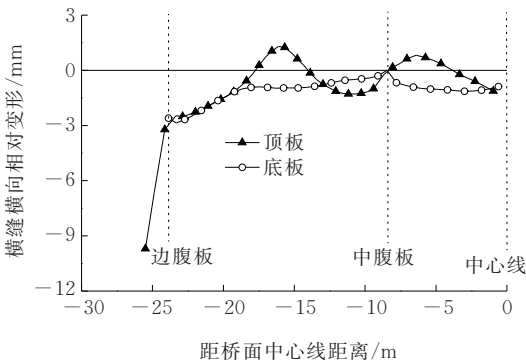


图6 起吊梁段横桥向拼接面相对变形情况

由图6可以看出:顶板在边腹板外缘部分下挠相对更明显,最外缘相对于中腹板下挠9.7 mm。这是因为该处加劲肋相对较薄弱,而且是开口截面,最近的横隔板也有2.75 m,相当于2.75 m长度方向是悬臂状态。起吊过程中可以考虑临时加固措施。除此部分外,下挠均在3 mm以内。起吊梁段沿顺桥向开口处相对变形如图7所示,参考点为第一块横隔板与中腹板相交位置,最大变形为1.9 mm,位于最外侧,即与横向匹配面交点位置,该处离横隔板距离2.75 m,悬臂长度较大。顺桥向拼接口最大变形比横桥向拼接口小7.8 mm,且在有横隔板范围内变形均在1 mm以内。

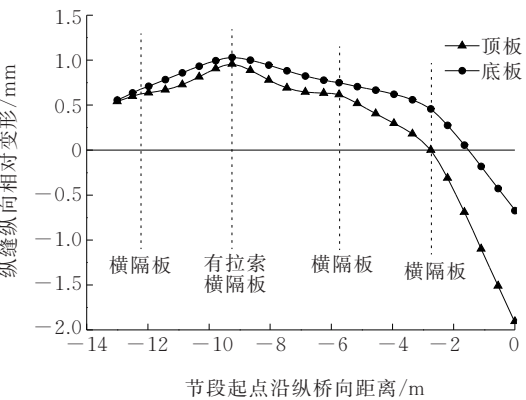


图7 起吊梁段顺桥向拼接面相对变形情况

对比整节段安装的方案,由于整体起吊,桥面吊机布置在两侧中腹板。整体起吊时已安装梁段拼接

面相对变形如图 8 所示。

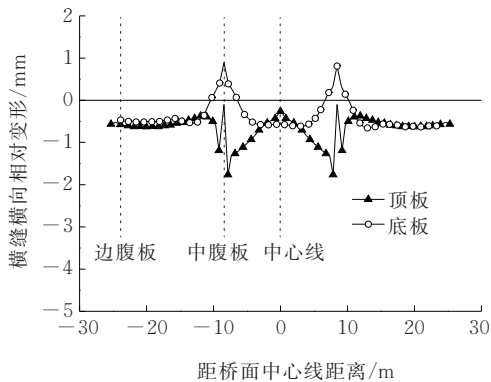


图 8 整节段安装悬臂梁段横向相对变形情况

由图 8 可以看出:顶板边腹板相对中腹板下挠仅 0.6 mm,不存在偏载效应。对比分析表明横向分块后钢箱梁匹配焊接较整节段安装复杂,工作量增多。

值得注意的是,横向分块的方法,横移匹配前还有跨中起吊工况,桥面吊机外侧是作用在边腹板上,该处相对于中腹板处来说刚度较小。两个工况的变形情况如图 9 所示,边腹板的变形差达到了 29 mm。实际施工过程中,该变形差随着横移匹配(桥面吊机支反力偏移到刚度较大的中腹板处)能否恢复值得关注。匹配对齐时已安装悬臂梁段与吊装梁段拼接面变形如图 10 所示。

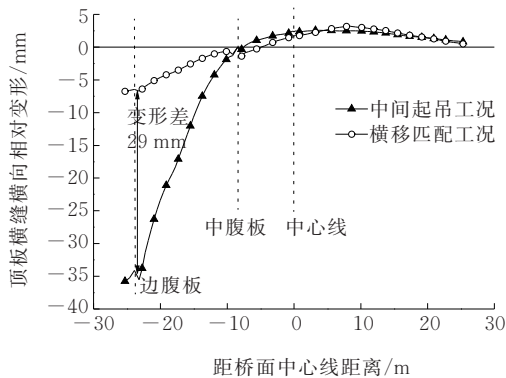


图 9 横向分块安装两工况变形情况

由图 10 可以看出:边腹板错缝高差为 4.2 mm,中心顶板错缝高差为 3.7 mm。该错缝高差在工程可操作范围内,可通过千斤顶局部调整,中腹板对齐后,可采用桥面吊机卸载的方式辅助调整边腹板错缝。

当左半块钢箱梁匹配完成后,进行另半块钢箱梁的匹配,此时存在两个拼接面,即顺桥向和横桥向,横桥向同样以刚度较大的中腹板为参考点,顺桥向则以第一块横隔板为参考点,具体相对变形如图

11、12 所示。

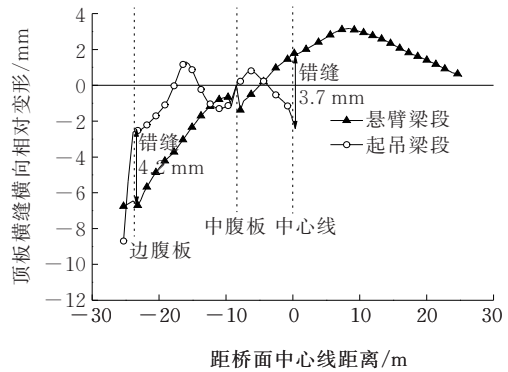


图 10 横移匹配时已安装梁段与待安装梁段错缝情况

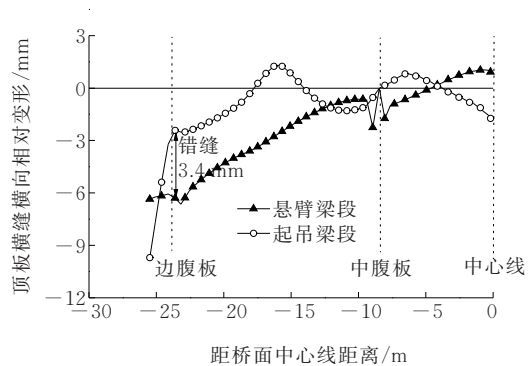


图 11 横移匹配时横桥向拼接面相对变形情况

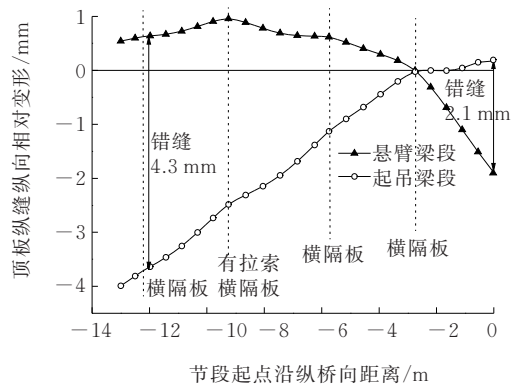


图 12 横移匹配时顺桥向拼接面相对变形情况

由图 11、12 可以看出:横桥向拼接面边腹板缝差为 3.4 mm,较左半块钢梁安装时略有减小。顺桥向拼接面最大缝差为 4.3 mm,这主要是由于已安装梁段自由悬臂状态导致下挠,最远端达到了 4 mm,该整体竖向位移可通过提前挂设该侧斜拉索来调节。安装剩下半块时,先将已安装完半块钢箱梁处的斜拉索挂设张拉,以调节已安装半块钢箱梁的竖向变形,再匹配横桥向拼接面刚度较大的中腹板,然后匹配顺桥向拼接面,再匹配横桥向拼接面剩余区域,顺桥向

拼接面匹配按照优先匹配刚度大的横隔板,然后再匹配横隔板之间局部区域。

4 结论

巴拿马四桥主桥钢箱梁具有超宽、超重的特点,且施工期间不得占用通航水域。本文提出将中跨钢箱梁进行横向分块,通过索塔侧向提梁上桥面,梁上运梁至悬臂端,采用桥面吊机空中转体移梁匹配的方法有效地解决了上述问题,对钢箱梁局部横向变形分析得出以下结论:

(1)与整体架设相比,横向分块安装方法会存在明显的横向偏载效应,中间起吊工况尤其明显,边腹板相对中腹板变形高达35 mm,但是横移匹配时,原作用在边腹板上的反力大部分偏移到刚度较大的中腹板侧,边腹板相对中腹板变形会明显减小,最大错缝高差仅4.2 mm,故本文提出的横移匹配方式有利于拼接面变形的控制。

(2)横向分块起吊梁段为开口截面,局部位置的变形较大,最大值为9.7 mm,位于边腹板外侧悬臂段,除了边腹板外侧区域,其他位置变形均在3 mm以内,起吊过程中局部位置需要加强。

(3)本文提出的横向分块安装方法存在横桥向和顺桥向两个拼接面,其中横桥向拼接面变形较顺桥向变形大。且已安装悬臂梁段顺桥向拼接面竖向变形可通过提前安装斜拉索进行调整。故建议安装剩下半块钢梁时,先匹配横向刚度大的中腹板,然后匹配变形相对较小的顺桥向拼接面,其中优先匹配横隔板,然后局部调整匹配横隔板中间区域,最后进行横桥向剩余位置的匹配,可通过吊机卸载的方式辅助调整。

总体来说,本文提出的跨繁忙航道超宽钢箱梁梁上运梁、分块安装方案与常规整体段起吊相比,存在以下难点:

(1)存在纵横向两个匹配面,匹配焊接的先后顺

序分析更为复杂。

(2)起吊梁段为两边开口断面,起吊节段两个断面的变形也关乎优先匹配面的选择。

(3)桥面吊机布置两侧支点下刚度不一样,若中心起吊,支反力相同的情况下,两侧变形不一样。

通过相对变形分析提出适合纵横向分块的合理匹配焊接顺序,同时进行吊点的合理布置,针对桥面吊机支点作用位置刚度不同,提出横移匹配的方式,将支反力转移到刚度更大的一侧,通过本文提出的匹配方法,使错缝高差控制在实际工程可操作范围内,满足现场实施要求。

参考文献:

- [1] 马琼锋,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.
- [2] 陈思铭,陈常松,颜东煌.基于逐段安装线形的钢箱梁制造尺寸计算研究[J].中外公路,2020,40(2):91-94.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 李传习,袁鹏,罗超云,等.嘉绍大桥架设钢箱梁局部受力的不利阶段及其效应分析[J].中外公路,2014,34(1):117-120.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 汪劲丰,乌添媚,王建江,等.基于部分抗剪的钢箱梁横向分块施工效应分析[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(7):1380-1388.
- [9] 汪劲丰,张良,向华伟,等.城市钢箱梁桥横向分块施工分析[J].桥梁建设,2017,47(1):109-113.
- [10] 王道义.混合梁斜拉桥钢箱梁梁上运梁法架设关键技术[J].安徽建筑,2014,21(3):121-124.
- [11] 马耕.混凝土宽箱梁桥上运梁过程仿真分析[J].铁道建筑,2011,51(1):1-3.