

# 宽幅双层钢桁梁斜拉桥悬臂拼装匹配技术研究

吴升宇, 刘建, 董创文

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 针对宽幅双层钢桁梁斜拉桥桥面板在悬臂拼装过程中出现变形不匹配的问题,以广东中山联石湾特大桥为研究背景,采用 ANSYS 软件建立标准梁段精细化模型,分析关键工况下已安装梁段与待安装桥面板在悬臂拼装过程中的受力状态,研究钢桁梁正交异性钢桥面板的横向变形规律,分析桥面板产生不匹配变形的主要原因,并据此提出结构优化措施和施工工艺优化措施。

**关键词:** 桥梁;钢桁梁;斜拉桥;正交异性钢桥面板;桥面吊机;悬臂拼装

**中图分类号:** U445.466

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2023)01-0120-05

钢桁梁的主要安装方法有整体吊装法、顶推法、悬臂拼装法等,当施工条件受水闸与船闸结构及防洪、通航制约时,采用全回转桥面吊机悬臂拼装是一种较合理的方法<sup>[1]</sup>。桥面吊机在起吊待安装梁段的过程中,悬臂梁段受到桥面吊机前后支点反力、斜拉索索力和梁段自重的作用,且正交异性钢桥面板两端与主桁连接,悬臂梁段的受力状态类似于受集中力作用的简支梁;而待安装梁段受到吊点拉力和自重作用,且正交异性钢桥面板只有在吊点处有约束,两端自由,待安装梁段的受力状态类似于受自重作用的悬臂梁。由于两种梁段的受力状态不同,其横向变形不一致,导致悬臂梁段的正交异性钢桥面板和待安装梁段的正交异性钢桥面板出现变形不匹配,进而引发匹配断面桥面板错缝过大的问题<sup>[2]</sup>。如何控制好钢桁梁在悬臂拼装施工过程中的横向安装线形,减小因为施工误差而产生的安装残余应力,已成为宽幅双层钢桁梁悬臂拼装的关键。目前对钢

桁梁悬臂拼装施工工艺的研究已相对完善,但大多数研究关注整体线形控制及施工顺序优化,而忽视正交异性钢桥面板局部受力对钢桁梁悬臂拼装匹配断面的影响<sup>[3-5]</sup>。本文以广东中山联石湾特大桥为背景,探究钢桁梁结构悬臂拼装匹配过程中横向变形产生的原因及影响因素,研究针对性的措施保障施工的顺利实施,为后续类似工程提供解决思路。

## 1 工程概况

### 1.1 设计概况

联石湾特大桥为独塔两跨钢桁梁斜拉桥,桥跨布置为  $2 \times 206 \text{ m} = 412 \text{ m}$ 。主梁采用双桁双层框架断面;斜拉索采用 1 860 MPa 平行钢丝,呈扇形布置;索塔采用门式混凝土塔,在索塔下横梁处设置竖向支座和横向抗风支座,全桥采用半漂浮体系。

图 1 为主桥钢桁梁标准横断面。主梁采用三角桁架双层钢桁梁,主梁全宽 36.6 m,主桁上下弦杆

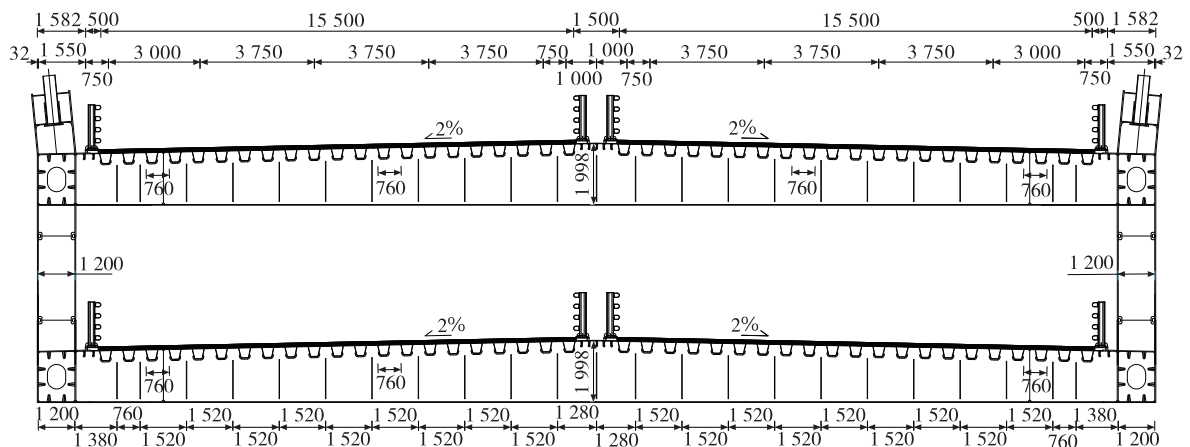


图 1 联石湾特大桥主桥钢桁梁标准横断面(单位:mm)

中心距为 10.55 m,钢桁梁由主桁架、横隔板和桥面板组成。

## 1.2 施工工艺

全桥共划分为 33 个梁段,其中:索塔区梁段共 3 段,利用钢管立柱支架+履带吊吊装进行拼装;边跨主梁合龙段共 4 段,采用全回转桥面吊机散件对称悬臂拼装焊接工艺进行安装;标准梁段共 26 段,采用全回转桥面吊机整体对称悬臂拼装焊接工艺进行安装。标准梁段悬臂拼装流程见图 2,钢桁梁吊装见图 3。

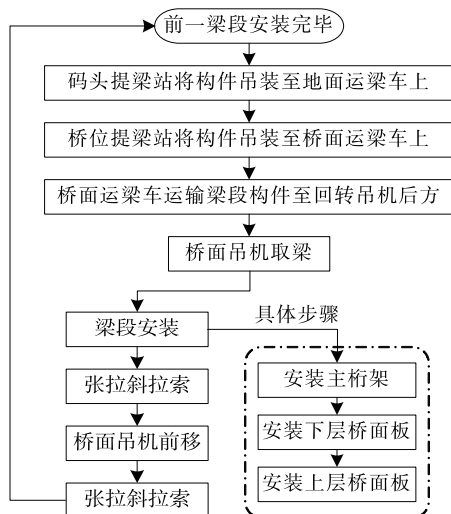


图 2 标准梁段悬臂拼装流程

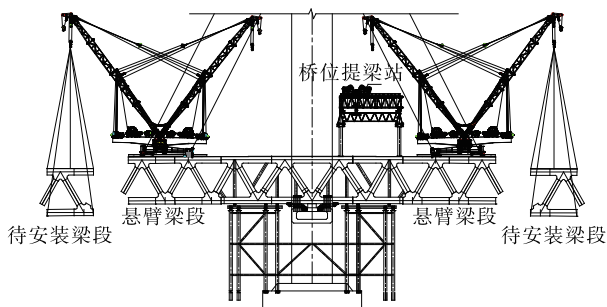


图 3 标准梁段钢桁梁吊装示意图

标准梁段悬臂拼装采用 80 t 全回转桥面吊机,吊机支点纵向间距为 12.0 m,横向间距为 12.0 m。图 4 为桥面吊机布置俯视图。

考虑到标准梁段质量较大,将标准梁段划分为主桁架和正交异性钢桥面板分批次进行安装。受施工场地限制及起重设备影响,对待安装梁段的钢桥面板再次分块。待安装梁段的吊点纵向设置在对应横隔板处,受桥位处提梁站净空限制,吊点距桥梁中线的距离为 8.880 m(见图 5)。

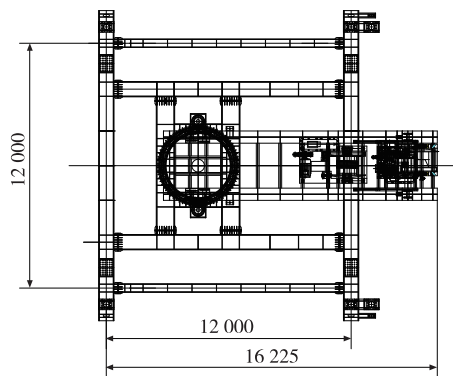


图 4 桥面吊机布置俯视图(单位:mm)

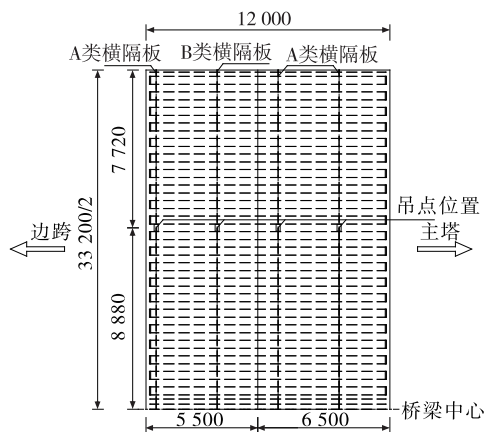


图 5 桥面板分块及吊点布置示意图(单位:mm)

## 2 有限元分析

### 2.1 有限元模型建立

该桥主梁采用双桁双层框架断面,正交异性钢桥面板由桥面板、U 肋和横隔板组成。传统的正交异性钢桥面板分析理论将其划分为 30 种结构体系,分别为第一体系(主梁体系)、第二体系(桥面体系)与第三体系(盖板体系)<sup>[6]</sup>。

在各种荷载作用下,正交异性钢桥面板会出现纵向弯曲、横向弯曲、翘曲和畸变等现象,采用第一体系进行分析很难全面反映正交异性钢桥面板的局部应力效应和变形特征。为此,对该桥正交异性钢桥面板的第二体系进行分析<sup>[7]</sup>,研究悬臂梁段和待安装梁段正交异性钢桥面板的变形情况。

采用通用有限元分析软件 ANSYS 建立梁段模型。根据圣维南原理,截取桥面吊机作用梁段附近的 3 个梁段进行模拟<sup>[2]</sup>,其中正交异性钢桥面板采用空间板壳单元 Shell181 模拟,主桁架采用空间梁单元 Beam188 模拟。

为简化边界条件,在近塔端的梁段断面施加固

结约束,减少远端约束对匹配断面相对变形的影响;将正交异性钢桥面板单元与主桁架单元耦合节点自由度,模拟钢桥面板与主桁架的连接。采用悬臂拼装施工的斜拉桥,其钢桁梁结构竖向位移包括整体变形和局部变形两部分,鉴于斜拉索索力主要影响整体变形,而本文意在分析正交异性钢桥面板匹配断面的相对变形,简化斜拉索索力作用的影响,将斜拉索索力简化为约束施加到斜拉索锚固点上。标准梁段的局部有限元模型见图6。

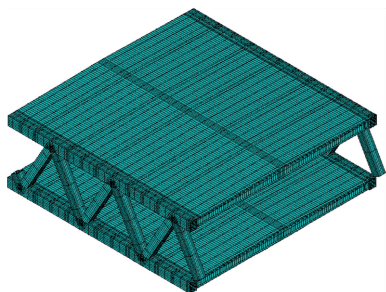


图6 标准梁段的局部有限元模型

施工过程中,悬臂梁段受到的桥面吊机前后支点反力根据桥面吊机制造厂商提供的数据进行加载,分为两种工况:工况一为空载状态,桥面吊机未起吊待安装梁段,前后支点反力分别为540.0 kN、445.0 kN;工况二为起吊状态,桥面吊机起吊待安装梁段,前后支点反力分别为1248.5 kN、136.5 kN。

起吊过程中,待安装梁段主要受到吊点拉力和梁段自重的作用。考虑到钢桁梁的安装定位多在夜晚温差变化较小的时段进行,假定钢桁梁各部件的温度一致,忽略温度梯度对结构的影响。

## 2.2 计算结果与分析

悬臂梁段受到梁段自重作用,桥面板整体呈下挠趋势,桥面板及横隔板相对变形见图7。由图7可知:桥面板整体下挠,且越靠近中线处,相对变形越大。由于近塔端的梁段断面施加固结约束,其位

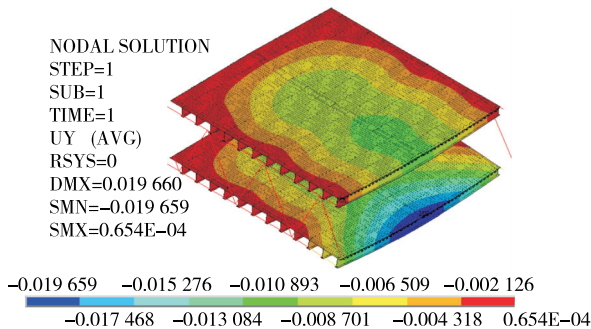


图7 梁段自重作用下悬臂梁段竖向变形(单位:m)

移为零,而实际已安装梁段桥面板由于自重会产生变形,根据圣维南原理,如果仅考虑匹配断面的相对变形,可忽略远端约束的影响。桥面板最大变形出现在下层桥面板悬臂匹配端中线处,桥面板中心线处相对于钢桁梁斜拉索锚固点的相对位移为-19.7 mm。

悬臂梁段受到桥面吊机荷载作用,由于上层桥面板受到桥面吊机荷载作用,而下层桥面板不受外力作用,上层桥面板整体下挠,下层桥面板基本不发生形变,桥面板及横隔板相对变形见图8。由图8可知:在两种桥面吊机荷载作用下,桥面板最大变形出现在上层桥面板悬臂匹配端中线处,桥面板中心线处相对于钢桁梁斜拉索锚固点的相对位移分别为-15.4 mm、-35.6 mm。

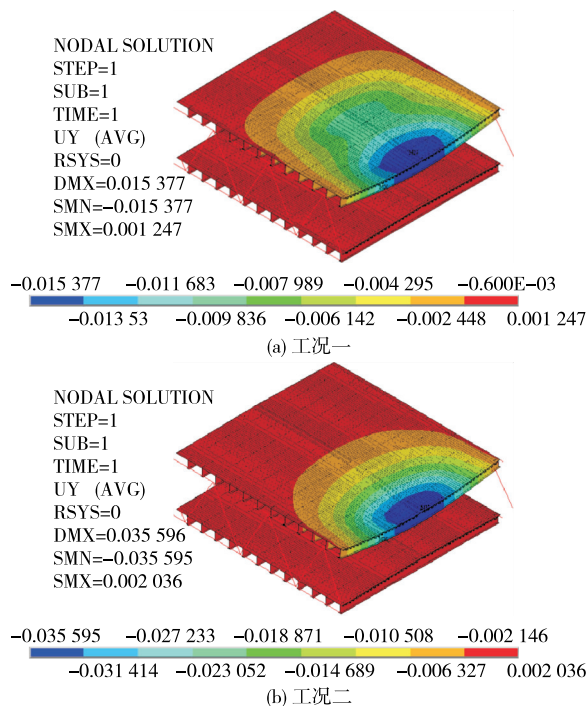


图8 桥面吊机荷载作用下悬臂梁段竖向变形(单位:m)

待安装梁段受到其梁段自重作用,桥面板两端和桥面中心线处下挠,桥面板及横隔板相对变形见图9。由图9可知:桥面板中心线处相对于吊机吊点处的相对位移为-1.0 mm,桥面板两端悬臂端相对于吊机吊点处的相对位移为-3.2 mm,最大位移出现在悬臂匹配端的两端。

悬臂梁段和待安装梁段正交异性钢桥面板的竖向变形对比见图10(主要提取上层桥面板变形数据)。由图10可知:悬臂梁段桥面板竖向变形远大于待安装梁段桥面板竖向变形,且待安装梁段在梁段自重和吊机吊点拉力作用下的竖向变形不明显。



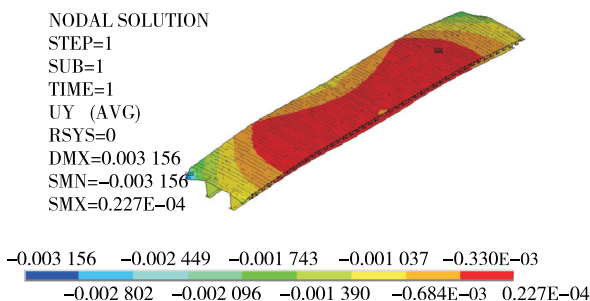


图 9 梁段自重作用下待安装梁段竖向变形(单位:m)

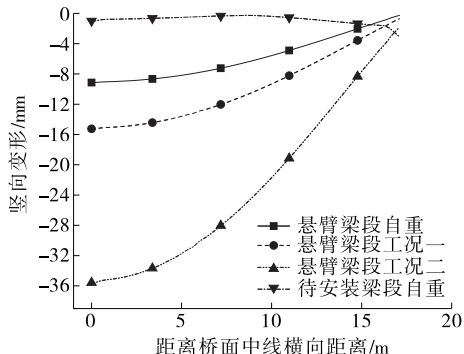


图 10 匹配断面竖向变形对比

综上,由于主桁架下弦杆悬臂段较长,在梁段自重作用下,主桁架下弦杆产生竖向变形,导致下层桥面板悬臂段竖向变形远大于上层桥面板,但上下层桥面板与其相连接的主桁架的相对位移接近;且由于双桁双层框架结构板在设计上没有永久支撑结构连接上下层桥面板,在桥面吊机荷载作用下,只有上层桥面板参与受力,导致上层桥面板变形较大。

### 3 施工控制优化措施

#### 3.1 斜腹杆与下弦杆之间增设临时支撑

由于施工过程中钢桁梁的节段划分中主桁架下弦杆的悬臂部分较大,主桁架下弦杆在受到梁段自重作用后发生竖向变形,不利于后续主桁架的安装,甚至可能导致主桁架下弦杆的安装线形与设计线形有差异。为解决这个问题,在主桁架下弦杆前端设置与主桁架腹杆的临时连接(见图 11),使主桁架下弦杆悬臂部分由悬臂状态转换为类似于两点简支状态,减少下弦杆前端竖向变形。

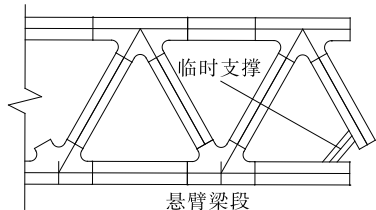


图 11 钢桁梁下弦杆临时支撑布置示意图

#### 3.2 上下层桥面板之间增设临时支撑

以往钢桁梁斜拉桥施工中,通常桥面吊机锚固点作用在主桁架或永久支撑结构上。但联石湾特大桥的双桁双层框架结构没有设置永久支撑结构连接上下层桥面板,且桥面宽度较大,施工过程中受到桥面吊机荷载作用时只有上层桥面板参与受力,导致上层桥面板变形较大。为解决这个问题,在钢桁梁上层桥面板吊机锚固点设置临时支撑连接下层桥面板(见图 12),使上下层桥面板共同受力,从而减少桥面板的相对变形。

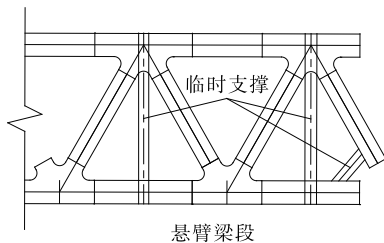
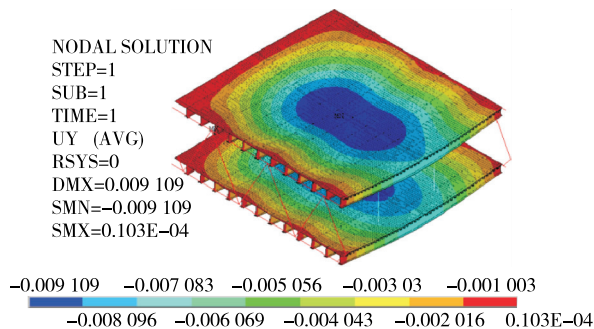


图 12 上下层临时支撑布置示意图

#### 3.3 悬臂梁段优化结果对比

设置临时支撑后,悬臂梁段在梁段自重作用下,桥面板整体呈下挠趋势,桥面板及横隔板相对变形见图 13。对比图 13 和图 7 可知:设置临时支撑后,桥面板整体竖向变形减小,最大位移出现在下层桥面板中心线处,桥面板中心线处相对于钢桁梁斜拉索锚固点的相对位移为-9.1 mm,主桁架下弦杆产生的下挠可忽略不计。

图 13 设置临时支撑后梁段自重作用下悬臂梁段  
竖向变形(单位:m)

设置临时支撑后,悬臂梁段在桥面吊机荷载作用下,上下层桥面板整体下挠,桥面板及横隔板相对变形见图 14。对比图 14 和图 8 可知:设置临时支撑后,桥面板整体竖向变形大约减小 50%,且桥面板竖向位移变形趋势与未设置临时支撑时类似,都为越靠近中线处和悬臂匹配端,相对变形越大;两种桥面吊机荷载作用下,桥面板最大变形出现在上层桥面板悬臂

匹配端中线处,桥面板中心线处相对于钢桁梁斜拉索锚固点的相对位移分别为 $-6.4\text{ mm}$ 、 $-15.0\text{ mm}$ 。

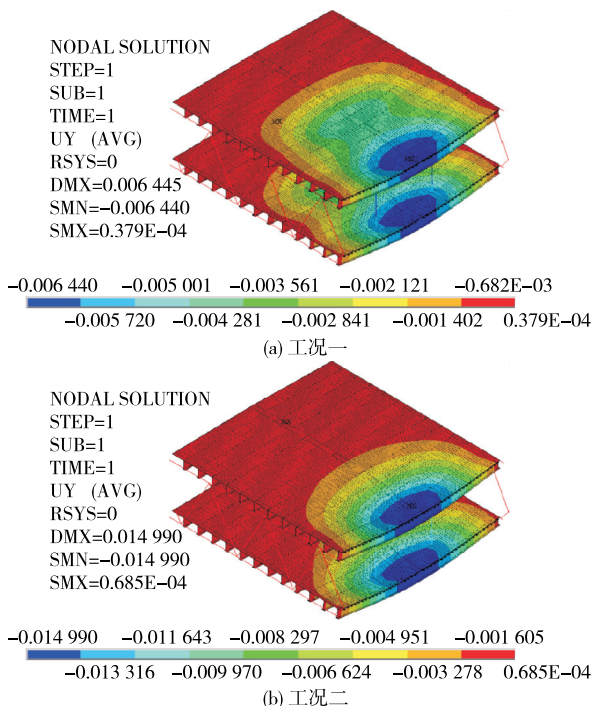


图 14 设置临时支撑后桥面吊机荷载作用下悬臂梁段竖向变形(单位: m)

### 3.4 待安装梁段匹配工艺分析

悬臂拼装过程中,待安装梁段正交异性钢桥面板对应的主桁架已安装完毕,在截面匹配时可先将正交异性钢桥面板的横隔板与主桁架的横隔板进行焊接,焊接完成后,对吊点拉力进行卸载,以减少桥面吊机各支点反力,从而减小悬臂梁段匹配断面的变形,同时待安装梁段正交异性钢桥面板的受力状态发生变化,转变为类似于受自重作用的简支梁。

吊臂拉力完全卸载时,待安装梁段受到梁段自重作用,桥面中心线处下挠,桥面板及横隔板相对变形见图 15。由图 15 可知:优化待安装梁段匹配工艺后,待安装梁段相对于钢桁梁的最大变形出现在桥梁中线附近,为 $-9.4\text{ mm}$ 。

### 3.5 施工优化后结果对比

施工优化后匹配断面竖向变形见图 16(主要提取上层桥面板变形数据)。对比图 16 和图 10 可知:施工优化后,悬臂梁段的各项变形明显减小,且由于待安装梁段的受力状态发生改变,待安装梁段的变形趋势也发生改变,由原来起吊状态下两端下挠变化为桥面中心线位置下挠。吊点拉力完全卸载时,悬臂梁段受到工况一的荷载及梁段自重作用,其最

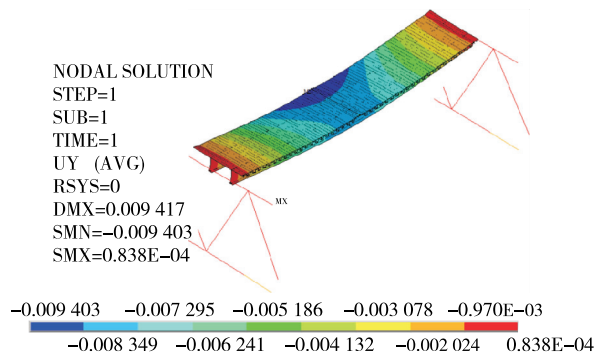


图 15 优化待安装梁段匹配工艺后梁段自重作用下待安装梁段竖向变形(单位: m)

大竖向变形为 $-13.2\text{ mm}$ ,出现在桥面中心线处,此时待安装梁段桥面中心线位置竖向变形为 $-8.7\text{ mm}$ ,不匹配变形为 $4.5\text{ mm}$ ,可通过定位卡马配合千斤顶进行调节。

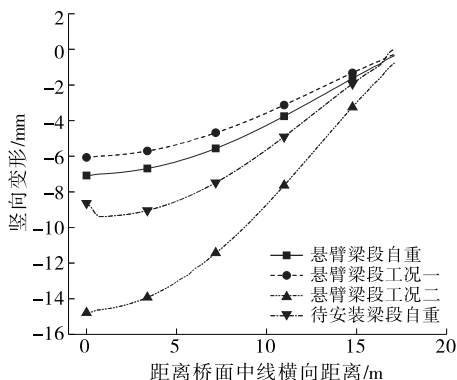


图 16 施工优化后匹配断面竖向变形

## 4 结论

悬臂拼装过程中,宽幅双层钢桁梁斜拉桥匹配断面正交异性钢桥面板出现错缝过大现象的主要原因如下:由于主桁架下弦杆悬臂段较长,在梁段自重作用下,悬臂梁段下层桥面板竖向变形远大于上层桥面板;由于上下层桥面板未设置永久支撑结构,在桥面吊机荷载作用下,仅上层桥面板参与受力,上层桥面板的竖向变形远大于下层桥面板;待安装梁段在起吊状态下,受自重作用产生的竖向变形较小。

可采取以下措施减小匹配断面的不匹配变形:设置临时支撑,减小下弦杆前端竖向变形,并连接上下层桥面板,使其共同承受桥面吊机荷载,减小悬臂梁段上层桥面板匹配断面的竖向变形;优化匹配工艺,改变待安装梁段的受力状态,同时吊点拉力的卸载能减小由桥面吊机荷载引起的各支点反力,进一步减小悬臂梁段在截面匹配过程中的竖向变形。

(下转第 128 页)

由图 9、图 10 可知:1) 优化钢束布置后,在最大轴力作用下,拱脚第一主应力中,拱肋大部分区域的应力为 $-0.19\sim 0.95$  MPa,最大应力(达 2.96 MPa)出现在混凝土拱肋与跨中方向实心箱梁表面连接处附近,最小应力(为 $-0.48$  MPa)出现在混凝土拱肋拱背与实心箱梁连接处,最大、最小应力影响区域非常小,且扩散快,混凝土拱肋大部分区域处于受压状态;在第三主应力中,拱肋大部分区域的应力为 $-8.61\sim -5.09$  MPa,拉应力主要出现在混凝土拱肋顶表面颜色较深的区域(最大应力为 0.20 MPa),最小应力(为 $-20.95$  MPa)出现在混凝土拱肋顶表面锚固预应力钢束处。2) 与优化前工况二下受力对比,优化预应力钢束布置后,第一主应力分布中,混凝土拱肋绝大部分区域仍处于受压状态,与原方案对比压应力仅减小 0.02 MPa;第三主应力分布中,混凝土拱肋顶表面应力集中区域减少,最大压应力由原方案的 23.2 MPa 减小到 20.95 MPa。在混凝土拱肋与跨中方向实心箱梁接触位置附近出现的拉应力由 3.16 MPa 减小到 2.96 MPa。混凝土拱肋绝大部分区域仍处于受压状态,压应力最大减小 0.5 MPa。改变钢束布置后对混凝土拱肋的储备压应力影响非常小,但混凝土拱肋顶表面局部应力集中区域明显减小。可见,改变预应力钢束布置能改善局部应力集中现象,提高混凝土的耐久性能,且不会影响混凝土拱肋的受力状态及与实心箱梁段的结合能力。全桥少张拉 4 对预应力钢束,不仅能节省材料,降低桥梁建设成本,还能减少一部分张拉钢束施工时间,加快施工进度。

#### 4 结论

(1) 在拱脚最大弯矩和最大轴力工况下,拱脚大部分区域以受压为主,应力分布均匀;最大拉应力

主要出现在混凝土拱肋与跨中方向箱梁表面连接处附近,对拱脚结构影响不大,该区域可通过加密钢筋来分散应力。

(2) 优化预应力钢束后对拱脚结构受力影响很小,但能改善混凝土拱肋顶表面局部应力集中状况,不仅能节省材料,降低桥梁建设成本,还能减少一部分张拉钢束施工时间,加快施工进度。

#### 参考文献:

- [1] 马坤全,李国胜,吴定俊.V形刚构组合拱桥拱脚空间应力分析[J].世界桥梁,2003,31(1):48-51.
- [2] 周云岗,洪慧卿,鄢余文.大跨径钢箱系杆拱桥拱梁结合段局部受力分析[J].中国市政工程,2021(1):8-11+83.
- [3] 崔凤坤,朱谊彪,杜朋,等.钢管混凝土系杆拱桥拱脚一致多尺度建模及分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2017,38(2):211-217.
- [4] 王振华,刘信.拱脚受力分析和破坏机理探讨[J].工程与建设,2017,31(1):67-70.
- [5] 肖光清,李传习,李斌.梁拱组合体系桥拱脚局部受力分析[J].公路与汽运,2014(1):189-192.
- [6] 王志刚,王志海.三连拱主拱拱脚的局部受力分析[J].武汉工程大学学报,2011,33(10):28-31.
- [7] 闫广鹏.重载铁路简支钢管混凝土系杆拱桥拱脚应力分析[J].交通科技,2020(4):23-27.
- [8] 李金凯.钢管混凝土梁拱组合桥拱脚局部应力分析[J].铁道勘察,2017,43(6):107-109+114.
- [9] 谢肖礼,彭文立,秦荣.圣维南原理在钢管混凝土拱桥分析中的应用[J].中国公路学报,2001,14(2):33-35.
- [10] 杨高平,张霆浩.下承式钢管混凝土系杆拱桥拱脚局部应力分析[J].南阳理工学院学报,2014,6(3):72-75.

收稿日期:2021-12-22

\*\*\*\*\*  
(上接第 124 页)

#### 参考文献:

- [1] 岳丽娜,陈思甜.钢桁梁桥施工架设方法研究综述[J].公路交通技术,2006,22(3):86-89+111.
- [2] 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.
- [3] 张忠文.大跨度超宽桥面钢混组合梁悬臂拼装施工工艺研究[J].工程建设与设计,2020(8):103-106.
- [4] 何旭辉,刘立亚,邹云峰,等.铁路钢桁梁斜拉桥单悬臂

施工方法研究[J].桥梁建设,2016,46(1):100-105.

- [5] 陈平,方伏浪,丁仕洪.玉磨铁路元江特大桥钢桁梁悬臂架设关键技术[J].桥梁建设,2021,51(5):123-129.
- [6] 韩冰.大跨度公路悬索桥钢箱梁正交异性桥面板的静力行为与疲劳性能研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [7] 王凌波,刘鹏,李源,等.宽幅钢箱梁斜拉桥悬臂匹配技术研究[J].中国公路学报,2016,29(12):102-108.

收稿日期:2021-12-27