

快速施工钢桁—混凝土组合连续刚构桥 装配工序优化分析

吴昊¹, 高燕梅^{1*}, 周志祥^{1,2}

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2. 深圳大学 土木与交通工程学院)

摘要: 为了实现钢桁—混凝土组合连续刚构桥的快速建造, 提出一种基于装配式 PCSS 剪力连接件的组合梁桥全装配式施工方法。该文针对 3 种桥面板安装和组配方案, 建立了精细化有限元模型, 进行了施工阶段优化分析。结果表明: 预制桥面板一次性焊接方案使得桥面板内获得预应力最高, 但结构挠度较大, 钢桁梁受力最大, 且 PCSS 剪力键焊接难度较大; 桥面板每一批次焊接方案使得钢桁梁受力和跨中挠度较小, PCSS 剪力键焊接难度较小, 但工期较长; 桥面板每两批次焊接方案中桥梁受力性能、变形和工期介于上述两种方案之间。因此, 在综合考虑结构受力、施工难易和工期的基础上, 桥面板每两批次焊接方案成为依托工程的推荐施工方案。

关键词: 桥梁工程; 快速建造; 组合连续刚构桥; 装配式施工; 优化分析

钢—混凝土组合桥梁充分利用了钢结构良好的抗拉特性和混凝土良好的受压特性, 具有自重轻、施工快捷、刚度大等特点, 并具有较好的经济效应。组合桥梁结构的施工也朝着预制化装配化方向发展, 目前装配式组合梁施工, 大多采用部分预制桥面板拼装后通过湿接缝连接的施工工艺, 降低了现浇桥面板的收缩徐变引起的附加内力, 运输安装方便快捷, 但也存在预制桥面板和后浇混凝土之间的接缝开裂以及现场混凝土施工问题。港珠澳大桥非通航孔组合连续梁桥采用单孔整跨预制, 整体吊装的施工方法, 实现了装配式施工

理念, 极大降低了现场环境对桥梁质量的影响, 提高了施工速度和施工质量。但是对于不同的桥梁结构体系和普通的中小型组合梁工程, 整跨吊装受成本和施工场地等条件的限制较难实现。因此, 针对目前组合梁施工存在的限制和问题, 该文提出一种基于全装配式施工的组合梁桥及与之配套的装配式剪力连接件, 桥面板分块预制且无需现浇混凝土湿接缝, 可保证桥面板的施工质量, 降低现浇混凝土收缩开裂问题, 缩短施工工期, 有效减少混凝土收缩徐变影响。但是该方法应用到钢桁—混凝土连续刚构桥施工中时, 由于桥面

- [3] 姚荣. 桥梁施工监控技术中的灰色系统预测模型对比分析[J]. 中外公路, 2011(5).
- [4] 章继树. 基于灰色系统理论的钢桁拱桥施工控制研究[J]. 世界桥梁, 2016(4).
- [5] 于天来, 陈武权. 灰色系统理论在预应力混凝土连续刚构桥高程监测中的应用[J]. 中外公路, 2008(3).
- [6] 谭国金, 王龙林, 程永春. 基于灰色系统理论的寒冷地区斜拉桥索力状态预测方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011(s2).

- [7] 刘庆昌, 王有志, 安俊江, 等. 马尔科夫残差修正灰色理论模型在连续梁桥施工监控中的应用[J]. 中外公路, 2017(5).
- [8] 张永水, 顾安邦. 灰色系统理论在连续刚构桥施工控制中的应用[J]. 公路, 2001(6).
- [9] Sun Q S, Wen—Tao P. Research on the Construction Monitoring for Long—Span Prestressed Concrete Bridge Based on Gray Prediction Model[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(11): 164—168.

收稿日期: 2020—04—20(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51778094); 重庆市自然科学基金资助项目(编号: cstc2018jcyjAX0509); 云南省交通运输厅科技项目(编号: 云交科(2018)28号)

作者简介: 吴昊, 男, 硕士研究生. E-mail: 18753364511@163.com

* 通信作者: 高燕梅, 女, 博士, 副教授. E-mail: lg2346@163.com

板与钢桁梁联结的先后顺序会对桥梁的受力性能和变形产生显著影响,因此,该文就施工阶段中各块桥面板预应力张拉与桥面板焊接的先后顺序问题,提出3种施工方案并对3种施工方案下的结构受力性能、变形和工期进行对比分析。

1 装配式钢桁—混凝土组合连续刚构桥施工方法和工序设计

1.1 设计概念

新型装配式钢桁—混凝土组合梁连续刚构桥采用新型 PCSS 剪力键,它是通过预埋在混凝土桥面板(PC)的剪力传递钢板(S)与钢桁上弦(S)焊接实现钢—混凝土联结的一种新型剪力键,如图1所示。

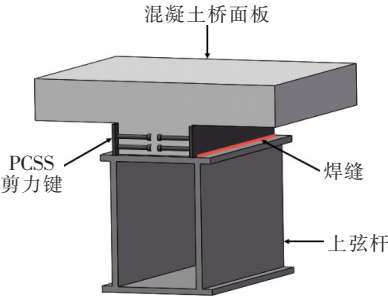


图1 PCSS 剪力键示意图

该连续刚构桥跨径布置为(41+70+41) m,分左右双幅布置,单幅上部桥面板宽 16.25 m,下部采用变截面钢桁梁,具体尺寸如图2、3所示。钢桁梁上弦杆为高 400 mm、宽 380 mm 的箱形截面,钢板厚 14 mm;下弦杆采用高 500 mm、宽 380 mm 的 H 形截面,墩顶处下弦翼缘和腹板厚度均为 50 mm,而跨中附近下弦翼缘厚 24 mm,腹板厚 14 mm。

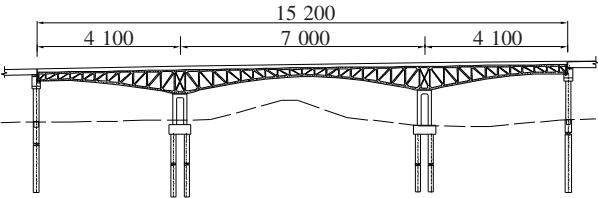


图2 桥梁跨径布置图(单位:cm)

1.2 基本施工工序

新型装配式钢桁—混凝土组合梁连续刚构桥施工工序:基础和桥墩施工,同时钢桁梁节段制作和预埋 PCSS 剪力连接件的桥面板预制→钢桁梁吊装→预制桥面板吊装及接缝处理→预应力张拉→桥面板与钢梁

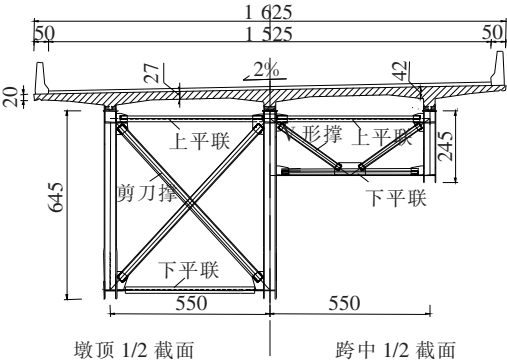


图3 桥梁横截面图(单位:cm)

焊接联结→桥面铺装→成桥。
在上述施工工序中,桥面板吊装、预应力张拉和剪力连接件的焊接是最复杂也是最关键的施工工序。
连续刚构桥为对称结构,以半跨为对象进行桥面板安装施工描述。为施工管理方便,对预制桥面板进行编号,如图4所示。每块桥面板的长度根据具体连续刚构桥的边中跨比和吊装能力来设计。

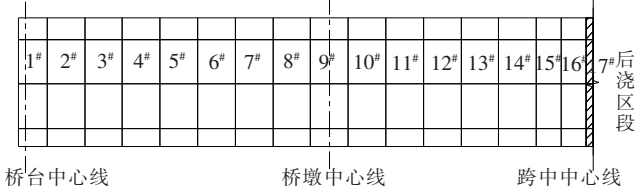


图4 桥面板编号及分布示意图

桥面板采用专门吊架进行吊装,吊架通过精轧螺纹钢与桥面板连接。为保证施工过程中桥梁的线形和受力性能,采用对称吊装桥面板方法,先安装墩顶处 9# 桥面板,以桥墩中线(9# 板中线)为对称线向中跨和边跨分别对称吊装桥面板。桥面板就位后张拉相应的预应力束并焊接剪力连接件,最后浇筑跨中合龙段。

2 桥面板安装施工方案讨论

2.1 桥面板安装及 PCSS 剪力连接件焊接方案

在桥面板安装过程中,预应力张拉和桥面板内 PCSS 剪力键焊接顺序的不同会影响桥面板应力、钢梁应力、跨中位移和施工工期等。因此,选择良好的桥面板装配施工顺序是影响桥梁结构受力性能的关键。预应力筋布置见图5。

根据桥面板 PCSS 剪力连接件的焊接顺序不同可分为3种桥面板安装施工方案。
方案1:桥面板每一批次焊接方案
该方案为每吊装一对(2块)预制桥面板焊接一

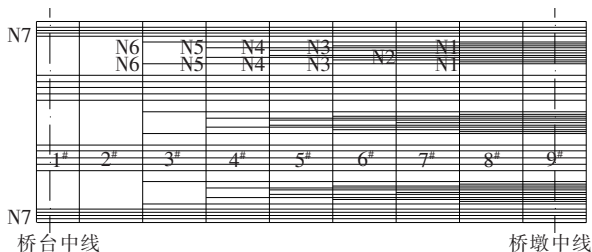


图 5 预应力筋布置示意图

次,PCSS 剪力键焊接长度短,便于焊接,并使得安装的桥面板参与受力,但是工期较长。

墩顶处 9# 桥面板吊装就位→9# 桥面板中部 50 cm 长度段剪力键焊接→8#、10# 桥面板吊装就位→相邻桥面板涂刷环氧树脂→张拉 N1 预应力束→8#、9#、10# 桥面板剪力键焊接→以墩轴线对称安装 7#、11# 预制桥面板→相邻桥面板涂刷环氧树脂→张拉 N2 预应力束→7#、11# 桥面板剪力键焊接→以此规律,每吊装一批(2 块)预制桥面板,张拉相应预应力束,剪力键焊接一次,直至全部预制桥面板安装完成。

方案 2:桥面板每两批次焊接方案

该方案为每吊装两对(4 块)预制桥面板焊接一次。

墩顶处 9# 桥面板吊装就位→9# 桥面板中部 50 cm 长度段剪力键焊接→8#、10# 桥面板吊装就位→相邻桥面板涂刷环氧树脂→张拉 N1 预应力束→7#、11# 桥面板吊装就位→相邻桥面板涂刷环氧树脂→张拉 N2 预应力束→7#~11# 桥面板剪力键焊接→以此规律,每吊装两批(4 块)预制桥面板,张拉相应预应力束,剪力键焊接一次,直至全部预制桥面板安装完成。

方案 3:桥面板一次性焊接方案

该方案为所有预制桥面板吊装后一次性焊接,施工过程中桥面板不参与受力,但桥面板连续吊装完成,工人一次性完成焊接工作,工期相对较短,剪力键焊接难度较大。

吊装 8#、9#、10# 号桥面板就位→9# 桥面板中部 50 cm 长度段剪力键焊接→张拉 N1 预应力束→吊装 7# 和 11# 桥面板就位→张拉 N2 预应力束→其他桥面板均按顺序吊装并张拉相应预应力束→所有桥面板吊装完、预应力张拉完后,全桥剪力键一次性焊接完成。

考虑到方案 1 工期长,方案 3 在施工过程中桥面板无法参与受力,方案 2 为介于方案 1、3 间的方案。

2.2 有限元模型的建立

为了研究预应力张拉和桥面板与钢桁梁焊接顺序不同对桥梁受力和跨中位移的影响,通过有限元软件

Midas/Civil 来进行模拟计算 3 种桥面板安装方法。全桥模型总单元数为 2 099 个,总节点数为 1 388 个,均为梁单元;上部结构混凝土桥面板由 414 个预制桥面板单元、18 个现浇段单元、176 个虚拟横梁单元和 150 个纵梁单元构成,钢桁梁单元由 1 129 个钢桁单元和 26 个合龙段单元组成;下部桥墩结构由 184 个单元构成。

为了与 3 片钢桁梁进行节点连接,桥面板沿横向分成 3 个主梁单元,并通过虚拟横梁进行连接,使得 3 片主梁共同受力。由于上弦杆和桥面板要通过节点连接来模拟剪力键连接,上弦杆单元划分与桥面板单元相同,节点对应,单元划分较密。其他杆件均是节点处连接,一个杆件一个单元,未进行节点加密。钢桁梁边界支承条件为沿横向的中间一片梁进行横向、纵向和竖向约束,另外两片边梁仅约束竖向和纵向。

在有限元模拟中,针对上述钢桁—混凝土组合连续刚构桥的施工过程,通过激活和钝化相应的结构组、边界组和荷载组来实现。钢桁梁结构组分为左钢桁、右钢桁和钢桁合龙段 3 部分。桥面板结构组分为桥面板 1#~7# 和跨中合龙段。桥面板和钢桁梁之间的剪力连接键分为临时连接和刚性连接两种边界组。这两种连接根据桥面板结构组分为临时连接 1#~7#、刚性连接 1#~7#、跨中合龙段临时连接和刚性连接几部分。在施工阶段,仅存在重力荷载和预应力荷载。预应力单元的布置位置与图 5 一致。

施工阶段在 Midas 中的模拟过程如下:

(1) 安装钢桁梁阶段。激活钢桁梁单元并施加钢梁自重,并施加边跨钢桁梁边界支承。

(2) 安装桥面板阶段。为实现桥面板与钢桁梁共同变形却不受力的情况,在钢桁梁和桥面板节点之间设置弹性连接。安装钢桁梁单元同时激活钢桁梁上弦杆节点与桥面板节点之间的弹性连接。弹性连接的 SD_x (竖直方向)刚度为剪力键刚度, SD_y 、 SD_z (顺桥向和横桥向)连接刚度均设为 1, SR_x 、 SR_y 、 SR_z 方向的连接刚度均设为 0,用此连接方式模拟桥面板自由放置在钢桁梁上,张拉桥面板预应力钢束时只有桥面板单独受预压应力,与实际施工情况相符。

(3) 张拉预应力钢束阶段。采用两端张拉的方式张拉预应力钢束。

(4) 桥面板与钢梁焊接阶段。将(2)中弹性连接改为刚性连接, SD_y 、 SD_z (顺桥向和横桥向)连接刚度均设为刚性连接,形成组合梁,以实现钢桁梁和桥面板共同承受荷载。

(5) 跨中现浇段合龙。跨中部分桥面板现浇,因此,该段桥面板与钢桁梁直接采用刚性连接,形成组合梁。

3 桥面板安装方案结果对比

通过有限元软件计算,分别提取3种不同桥面板安装方案下的桥面板应力、墩顶上下弦杆应力、中跨跨中上下弦杆应力以及跨中位移数据。具体分析如下:

3.1 桥面板应力分析

图6为3种施工方案下的各批桥面板内的应力分布图。

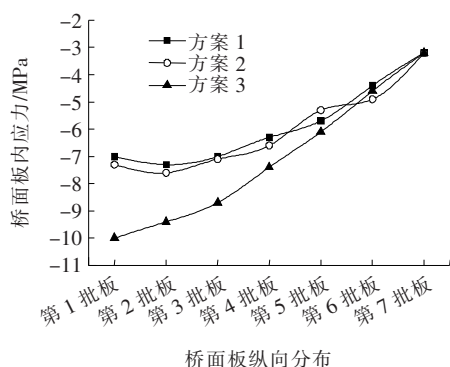


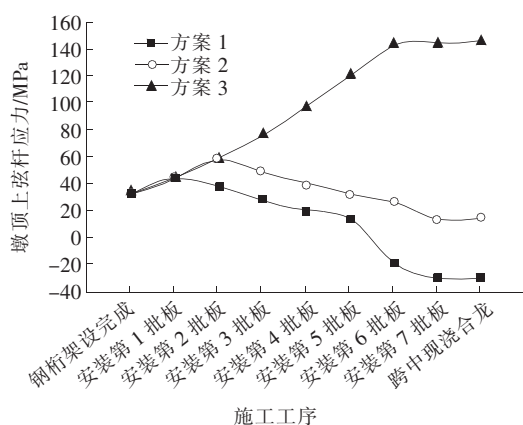
图6 桥面板应力分布图

由图6可知:方案3中桥面板内获得的预压力最大,方案1、2中桥面板应力相差不大。其中,方案3中第1批桥面板内的预压力比方案1、2中大43%左右,造成差异的原因:①桥面板和钢桁梁焊接造成预应力无法全部作用到前一批桥面板中;②桥面板焊接之后与钢桁梁一起参与受力,消耗了部分预应力。因此,方案1中的第1批桥面板内(墩顶处桥面板)预压应力远大于另两种安装方案。

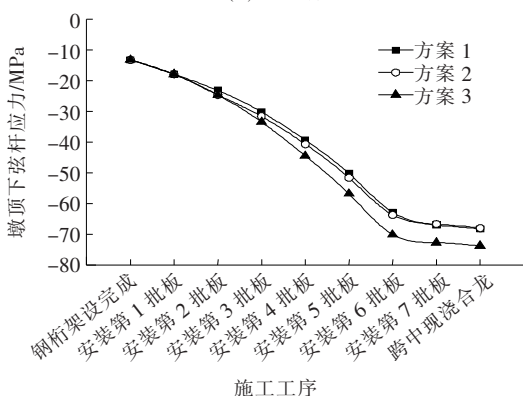
3.2 钢桁梁应力分析

研究钢桁梁应力时,主要以墩顶负弯矩处和中跨跨中正弯矩处为控制截面,以墩顶处上下弦杆和中跨跨中处上下弦杆为对象。施工阶段墩顶处上下弦杆应力如图7所示。

由图7(a)可知:不同的桥面板安装方法,墩顶上弦杆应力差异大。方案3与现有的大多数预制组合梁施工方法相同,施工阶段钢桁梁单独受力,随着钢桁梁上预制桥面板增多,墩顶负弯矩区段钢桁梁上弦杆拉力不断增加,基本保持线性上升趋势,跨中合龙时上弦杆拉应力达到145 MPa左右。相比之下,方案1、2由于焊接之后,桥面板与钢桁梁联结成整体,后续桥面板



(a) 上弦杆



(b) 下弦杆

图7 施工阶段墩顶处上、下弦杆应力变化图

内预应力束张拉时预应力会部分作用到钢桁梁上弦杆上。因此,采用方案1安装方法时:安装完成第1批桥面板后,钢桁梁上弦杆拉应力开始呈现出逐渐减小趋势,直到安装完成第5批桥面板,墩顶上弦杆拉应力减到0左右;在完成第6、7批桥面板安装后墩顶上弦杆受到压应力,约为30 MPa。方案2与1变化趋势相似,但受到预应力影响相对较小,合龙时墩顶上弦杆拉应力接近10 MPa,没有出现压应力。这也解释了3种方法下桥面板内压应力具有明显差异的原因。

由图7(b)可得:3种安装方案下墩顶钢桁梁下弦杆应力变化趋势一致,呈现出压应力逐渐增加的趋势。方案3中下弦杆应力比另外两种方案大11%左右。在安装第7批桥面板时,应力变化曲线出现拐点,是因为第7批预应力束多、预压力大,且作用于全部预制桥面板和钢桁梁,减小了应力增长幅值。通过以上分析可知:桥面板安装方法的不同对墩顶下弦杆的应力影响较小。

图8为施工过程中中跨跨中上下弦杆应力变化曲线。

由图8(a)可知:方案3与方案1、2相差较大,方

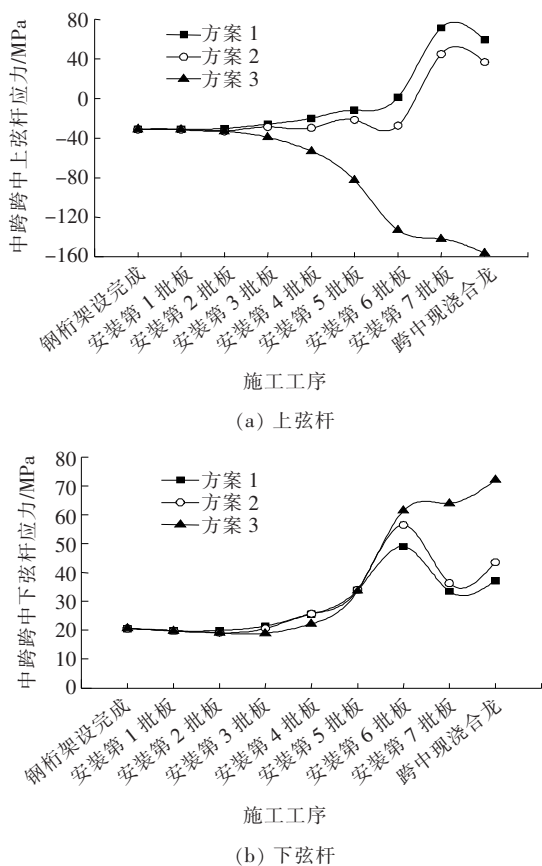


图8 施工阶段跨中钢桁梁上下弦杆应力变化图

案3中压应力呈增加趋势,安装前3批桥面板时压应力增速较慢,之后逐渐加快,最后达到160 MPa左右,主要是因为随着桥面板的安装,跨中承担的荷载越来越大。方案1、2曲线变化相似,安装前6批桥面板时,跨中上弦杆压应力变化小,呈缓慢减小的趋势;安装完第7批桥面板后,跨中上弦杆应力受预应力影响迅速减小变为拉应力。最后,跨中上弦杆拉应力受合龙段现浇混凝土重力影响减小到40 MPa左右。

由图8(b)可知:3种方案下跨中下弦杆应力变化趋势相似,在安装前4批桥面板时,3种方案下跨中下弦杆应力变化幅度较小,曲线比较平缓;安装第5、6批桥面板时,3种方案下的跨中下弦杆应力快速增大,方案3中的应力增幅最大为30 MPa左右,曲线有较大的跳跃;另外两种方案由于预应力部分作用到钢梁上,应力增幅较小。在安装第6批桥面板时由于第7批预应力束的张拉导致曲线出现一个拐点;其中,方案1、2中应力降幅较大,方案3中基本没有降低,这是由于方案3在张拉第7批预应力时,所有桥面板均没有与钢梁焊接,预应力不会传递到钢梁上。而方案1、2中桥面板已经与钢梁焊接并且第7批预应力束张拉端在跨

中区域,因此预应力作用大幅度降低了成桥后的跨中钢梁下弦杆拉应力。

3.3 桥梁跨中挠度变化分析

位移控制是施工阶段关键的控制节点,位移不仅影响施工阶段的受力性能还会影响成桥后的线形。通过数据收集得出施工阶段跨中位移的变化曲线如图9所示。

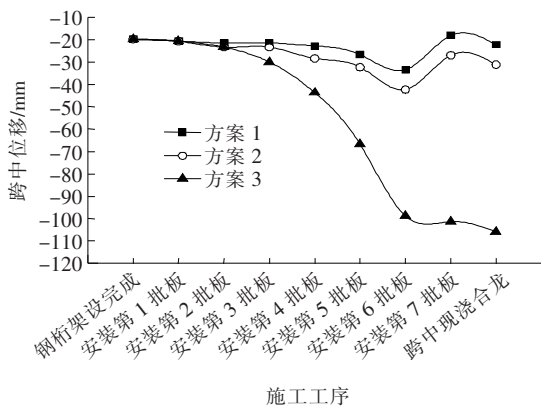


图9 施工阶段中跨跨中位移变化图

由图9可知:方案3中的跨中位移是逐渐增大,且增幅越来越大,一直到第7批桥面板才放缓,这是因为第7批桥面板和跨中合龙段体积小、重量轻。方案1、2跨中位移增长较为缓慢,合龙后,方案1、2中的跨中位移为方案3的25%左右,远低于方案3中的位移,这是因为方案1、2预应力张拉和施工过程中墩顶桥面板参与了受力。

综上所述:在3种不同施工方案下,装配式钢桁—混凝土组合连续刚构桥施工合龙后的5个关键构件应力和位移对比结果如图10所示。由图10可知:对于墩顶上弦杆应力、跨中上弦杆应力和跨中位移三者,不同方案之间的结果差异较大。

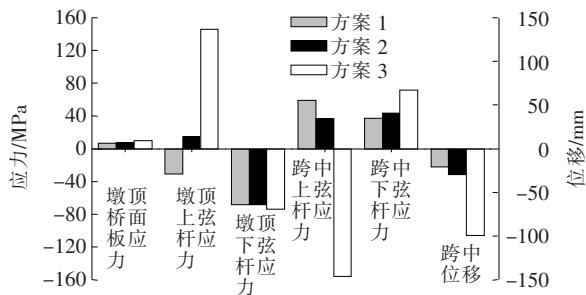


图10 合龙时应力和位移对比图

表1为3种施工方案成桥关键结果对比。

由表1可得:3种方案下桥梁合龙后桥面板内的应力分别为-7.0、-7.3和-10.0 MPa,方案3比其他两种大42%。方案3中的墩顶下弦杆压应力相比

表 1 3 种施工方案下成桥后关键数据对比

方案	墩顶			跨中		位移/mm
	桥面板应 力/MPa	上弦杆应 力/MPa	下弦杆应 力/MPa	上弦杆应 力/MPa	下弦杆应 力/MPa	
1	−7.0	−30.55	−68.2	59.4	37.2	−22.2
2	−7.3	14.55	−68.0	36.8	43.6	−31.1
3	−10.0	145.90	−73.8	−156.3	72.1	−105.7

其他两种方案大 8.5%。对于跨中挠度,由于方案 3 中桥面板不参与受力,全部由钢桁梁承担,因此,方案 3 中跨中位移比另外两种方案分别大 376%、240%。方案 3 墩顶上弦杆拉应力远远大于方案 1、2。与方案 3 存在差异的主要原因是:方案 1、2 中桥面板在施工阶段就能参与受力,而且预应力能通过桥面板传递到钢桁梁上弦,因此,墩顶和跨中上弦杆应力受预应力影响大,下弦杆应力受预应力影响小。其中,第 7 批预应力相对于其他预应力束数量多且作用于全部桥面板,所以对于桥面板和钢梁的影响均较大。

4 结论

基于 PCSS 剪力键的钢桁—混凝土组合连续刚构桥采用完全预制装配式快速化施工,为优化该类组合梁桥施工,根据桥面板与钢梁的焊接顺序批次不同,提出了 3 种桥面板安装组配方案。通过有限元模型计算分析,可得如下主要结论:

- (1) 桥面板一次性焊接方案中桥面板内预压应力最大,合龙后比另外两种方案大 43%左右,有利于延缓成桥后负弯矩区桥面板开裂问题;桥面板每一批次焊接方案中桥梁合龙后,桥墩负弯矩和跨中正弯矩处钢桁梁上下弦应力最小,有利于合龙后桥梁受力。
 - (2) 桥面板每一批次焊接方案和每两批次焊接方案中位移增长较为缓慢,合龙后,跨中位移为桥面板一次性焊接方案的 25%左右,保持了成桥后的合理性。
 - (3) 桥面板每一批次焊接方案中 PCSS 剪力键焊接难度较小,但施工工期长;桥面板一次性焊接方案中桥面板连续吊装完成,工人一次性完成焊接工作,工期短;每两批次焊接方案工期介于两者之间。
- 综上所述,桥面板每两批焊接方案介于另外两种

方案之间,既能保证良好的受力性能又能保证施工的快速化,基于以上优势,选择该种方案较为合理。利用此方案已经快速建成了广东广佛肇高速公路青岐涌大桥,目前该大桥运营状态良好。

参考文献:

[1] 项贻强,竺盛,赵阳.快速施工桥梁的研究进展[J].中国公路学报,2018(12).

[2] Su Q, Yang G, Bradford M A. Behavior of a Continuous Composite Box Girder with a Prefabricated Prestressed-Concrete Slab in its Hogging-Moment Region [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(8):1-13.

[3] Issa M A, Yousif A A, Issa M A, et al. Field Performance of Full Depth Precast Concrete Panels in Bridge Deck Reconstruction[J]. Pci Journal, 1995, 40(3):82-108.

[4] 王莉莉.钢—混组合桥梁预制桥面板湿接缝构造及传力研究[D].长安大学硕士学位论文,2017.

[5] 沈小平,梁峰.组合箱梁横向湿接缝纵向裂缝成因分析及内力计算[J].中外公路,2015(4).

[6] 朴泷,周高明,吴小兵,等.港珠澳大桥浅水区非通航孔桥钢—混组合梁施工技术[J].桥梁建设,2016(2).

[7] 邱柏初.预制桥面板在组合梁桥中的应用研究[J].世界桥梁,2011(6).

[8] 李成君,周志祥,苏慈,等.预制装配式组合剪力钉试验研究[J].桥梁建设,2015(5).

[9] 项彦茂,曾德子,高燕梅,等.装配式钢桁—混凝土组合连续刚构桥预制桥道板制作工艺研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018(9).

[10] 高燕梅,刘东,周志祥,等.考虑施工阶段的装配式钢—混凝土组合梁非线性全过程分析方法[J].公路交通科技,2017(9).

[11] 尹云厅.装配式钢桁—砼组合连续刚构桥施工技术及控制方法研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2017.