

doi: 10. 3969/j. issn. 1002 - 0268. 2014. 04. 015

嘉绍大桥主航道桥几何合龙控制

贾少敏, 赵 雷, 杨兴旺

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 嘉绍大桥主航道桥是世界上首座六塔、双幅、空间四索面斜拉桥, 全桥共有7个合龙口, 合龙方案复杂。针对传统温度合龙工艺所存在的问题, 基于几何控制法理论, 首先给出了一种新的合龙工艺——几何合龙; 其次介绍了合龙口姿态调整的计算方法及主航道桥选择几何合龙的原因; 最后介绍了几何合龙工艺在嘉绍大桥实施时的操作要点。几何合龙技术可消除合龙时的温度附加效应, 保证既定的合龙时间。实测数据表明采用几何合龙方式的嘉绍大桥主航道桥合龙后主梁线形平顺, 误差较小, 施工控制工作取得了较好的成果。

关键词: 桥梁工程; 多塔斜拉桥; 几何合龙控制; 成桥线形误差分析; 顶推力

中图分类号: U448. 27

文献标识码: A

文章编号: 1002 - 0268 (2014) 04 - 0087 - 07

Geometry Closure Control of Main Channel Bridge of Jiaying - Shaoxing Bridge

JIA Shao - min, ZHAO Lei, YANG Xing - wang

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: The main channel bridge of Jiaying - Shaoxing bridge is the world's first 6 - pylon separate - deck, 4 - cable - plane cable - stayed bridge. There are 7 closures and the closure scheme is complex. In the light of the problems of traditional temperature closure process, based on geometric construction control theory, first, we introduced a new closure process - geometry closure. Second, we introduced final closure attitude adjustment calculation method and the causes that selecting geometry closure for the main channel bridge. Finally, we introduced the operating details that implementing geometry closure process for Jiaying - Shaoxing bridge. Geometric closure technique can eliminate the additional effect of temperature and ensure the established closure time. The measured data show that the profile of the main girder of Jiaying - Shaoxing bridge is smoother and the error is smaller using geometry closure, the construction control work can achieve better result.

Key words: bridge engineering; multi - pylon cable stayed bridge; geometry closure control; analysis of profile error upon completion state; pushing force

0 引言

大跨度钢斜拉桥多采用悬臂拼装法施工^[1], 斜拉桥合龙前后的结构力学特点发生显著变化, 合龙后结构的线形、内力可调整量相对较小。合龙工艺对于保证悬拼施工桥梁成桥后内力合理, 线形平顺十分重要^[2-5]。温度合龙(配切合龙)工艺是目前

国内已建斜拉桥中采用最多的一种方法, 其以指定合龙温度下的合龙口宽配切合龙段长度。若指定的合龙温度与设计基准温度不一致时, 则将导致合龙段长度与设计合龙段长度间存在偏差, 从而产生附加变形和应力, 影响主梁成桥线形, 其对环境条件的依赖程度高^[5-7]。

以嘉绍大桥合龙控制为例, 基于应力几何控制

收稿日期: 2013 - 09 - 13

基金项目: 交通运输部科技项目(2010 - 353 - 333 - 130)

作者简介: 贾少敏(1985 -), 男, 山西忻州人, 博士研究生。(jiashaomin1@163.com)

理论^[6-14],首先介绍了一种新的合龙工艺——几何合龙,通过施加顶推力,使合龙口宽度达到设计合龙段长度。无论在何种温度下只需根据合龙口宽度的不同变化顶推力即可,对环境条件基本无要求;其次介绍了几何合龙工艺在嘉绍大桥实施时的操作要点;最后介绍了嘉绍大桥几何合龙控制的实施情况。

1 工程背景

1.1 工程概况

嘉绍大桥主航道桥为世界上首座六塔、独柱、空间四索面、分幅钢箱梁斜拉桥,其跨径布置为 $(70+200+5\times 428+200+70)\text{ m}=2\,680\text{ m}$,桥面最大纵坡为0.45%,如图1所示。单幅箱梁在辅助墩、过渡墩处各设置1个双向支座,在索塔托架处

采用纵向双排支座体系。整幅钢箱梁在6个索塔及过渡墩、辅助墩处均设置横向抗风支座约束梁墩、梁塔之间的横向相对位移。全桥在2个次边跨(Z4、Z7索塔处)设置塔梁顺桥向限位支座,在静、动力荷载下约束塔梁顺桥向相对位移。嘉绍大桥主梁连续长度达2 680 m,为解决长主梁温度变形对边塔受力产生不利影响的问题,在全桥的跨中位置(Z5、Z6索塔之间)设置刚性铰构造。施工期间,全桥在6个索塔处均设置了塔梁临时拉索,约束塔与梁之间的顺桥向相对位移。此外在Z3、Z5、Z6、Z8索塔处,X托架竖向支座垫石与钢箱梁之间设置顺桥向限位牛腿,牛腿与支座垫石之间预留1.0 cm缝隙;Z4、Z7索塔塔梁顺桥向限位支座安装完毕但不立即生效,在支座与索塔之间预留1.0 cm的缝隙。

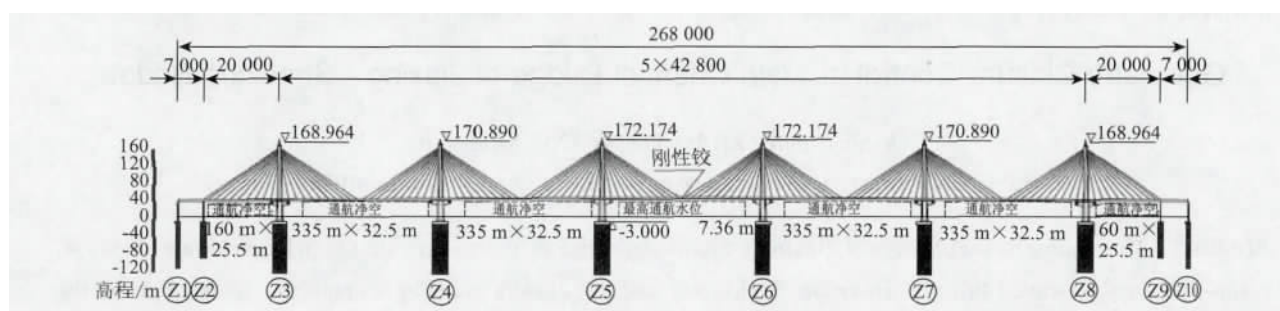


图1 嘉绍大桥桥型布置图(单位: cm)

Fig. 1 Layout of Jiexing-Shaoxing bridge (unit: cm)

1.2 合龙顺序

嘉绍大桥主梁现场施工时,采用的合龙顺序为:边跨Z2-Z3合龙口、Z8-Z9合龙口几何合龙→次边跨Z3-Z4合龙口、Z7-Z8合龙口几何合龙→中跨Z5-Z6刚性铰合龙(不需顶推)→次中跨Z4-Z5合龙口、Z6-Z7合龙口几何合龙。

2 几何合龙工艺

2.1 基于几何控制法施工主梁合龙时存在的问题

采用几何控制法进行施工控制时只需精确控制构件的无应力状态即可,主梁无应力状态量可用主梁制造长度及梁段间无应力夹角描述,斜拉索无应力状态量用其无应力制造索长表示^[8]。悬拼梁段间的制造无应力夹角准确确定是实现几何控制法的关键^[11],其计算原理如下:

图2中,B、C为理想安装线形^[11-14]上的2点,梁段②安装时,相邻的上一梁段①已由其安装位置AB变形至A'B',且此时梁段①的B'端断面产生了大小为 θ_{def} 的转角变形。A'B'间虚线部分是梁段①刚

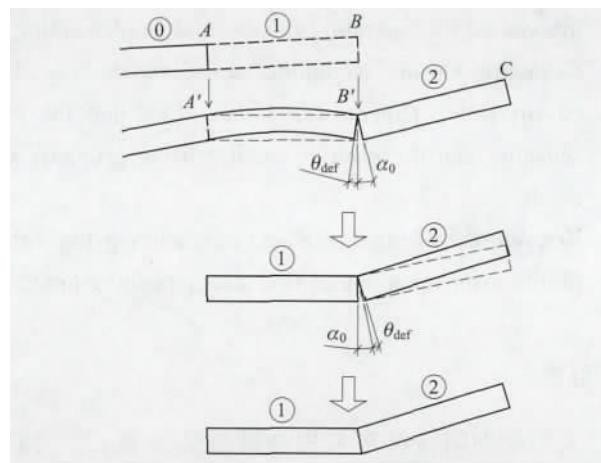


图2 梁段预拼夹角示意

Fig. 2 Schematic diagram of profile angle of beam segment preassembly

体移动后的位置,与待安装梁段②间的夹角为 α_0 。显然,若在制造预拼时将①、②间的无应力夹角设置为 $\alpha = \theta_{\text{def}} + \alpha_0$ (见图2),则在梁段②安装时,保证其倾角为 α_0 ,则它与梁段①拼接时的接口角度仍

为 α 。

需注意的是主梁无应力状态量及相应的斜拉索无应力索长是在设计基准温度 ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下,通过正装迭代计算求得。合龙段与相邻梁段的无应力夹角、合龙段的长度亦是在此条件下确定的。实际施工中,安装合龙段时环境温度与设计基准温度往往不一致,这种差异相当于在结构上施加体系温差,结构在体系温差作用下将发生变形。假若图2中 $A'B'$ 是设计基准温度下,起吊合龙段②时与其相邻梁段的目标位置,由于体系温差作用,已成梁段①的实际位置必然偏离目标位置 $A'B'$,造成合龙时合龙口形状与设计时的不一致,但合龙段尺寸在制造阶段已确定即无应力夹角 α 、合龙段长度均已确定,因此为实现主梁顺利合龙,必需通过调索、压重、顶推等临时手段调整合龙口的形状或重新配切合龙段改变其尺寸。

2.2 几何合龙

几何合龙是指严格按基准温度 ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下的设计尺寸制造合龙段,当合龙温度与基准温度不一致时,通过临时调索、临时压重调整合龙段两侧相邻梁段高程,通过施加外力调节合龙口宽度至设计合龙段长度,这相当于消除合龙温度与基准温度不一致对结构体系的影响,使得主梁的应力状态、线形与设计状态一致,不改变结构的成桥设计状态。其对环境条件的依赖程度低,一般可较准确地预测合龙时间。

3 合龙口姿态临时调整量计算

由第2节分析知:拼装时只要保证新安装梁段与已成梁段的拼接夹角为制造时的无应力夹角 α 则新安装梁段安装到位。由几何关系可知梁段间拼接夹角控制可转化为新拼梁段前端控制点的高程控制。图3中 $N-1$ 为已成梁段, N 为新拼梁段 (此处为合龙段), ABC 为理想安装线形。 $N-1$ 梁与新拼合龙段 N 梁间拼接夹角可通过梁段前端控制点 $T1-T3$ 的高程 $V1$ 、 $V2$ 、 $V3$ 来间接反映。由于合龙段端口形状在制造时已固定,合龙时为保证 $N-1$ 梁与 N 梁间拼接夹角需首先保证控制点高程 $V1$ 、 $V2$; 其次需通过测定 $N-1$ 梁 $T2$ 点的纵向坐标来确定合龙口宽度是否达到设计要求。当这几个控制点位置同设计位置 (包括标高和纵向坐标) 相符时,则可认为合龙段与已成梁段的无应力关系同设计状态时一致。施工中,合龙前控制点 $T1$ 、 $T2$ 位置同设计位置往往不相符,需调整合龙口的形状。

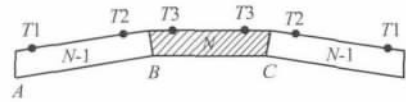


图3 嘉绍大桥悬拼梁段安装示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cantilever beam segment installation of Jiashao - Shaoxing bridge

3.1 合龙口标高调整

无论采用温度合龙、还是几何合龙,都需要对合龙段两侧相邻梁段标高进行调整,保证合龙时梁段的无应力曲率^[6]与设计目标一致,以此使合龙后的主梁线形、内力状态尽量逼近设计目标。实际调整操作时,通常是将合龙口附近的斜拉索放松或超张拉,通过改变斜拉索力使合龙口相邻梁段 (譬如 $N-1$ 梁段) 的标高 $V1$ 、 $V2$ 达到理想安装线形时的标高。有时单纯通过调索来提供调整梁段转角所需的局部弯矩是较困难的,有可能带来较大的调索工作量,此时可设置临时压重来调整。合龙完成后需将临时调索的斜拉索长放回相应制造无应力索长,同时撤除临时压重荷载。

临时调索量、合龙口附近临时压重量可采用影响矩阵法及线性规划法来求解^[5],也可用试算的方法多次试算求得。控制点标高调整量由实测控制点高程与理论控制点高程的差值确定,事实上此调整量中不仅包含了合龙温差引起的差异,也包含了施工过程中由于其他因素引入的误差。方案设计时可暂不考虑施工中的引入误差,但合龙温度与基准温度不同引起的主梁控制点高程变化应详细考虑。具体调整计算公式如下:

$$\begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta L \\ \Delta T \end{Bmatrix} = \{\Delta V\}, \quad (1)$$

$$\text{stg} \quad \min \| \text{abs} \Delta L \|, \quad (2)$$

式中, A 为斜拉索的调整量对控制点高程的影响矩阵; B 为压重荷载对控制点高程的影响矩阵; ΔL 为斜拉索的调整量; ΔT 为临时压重量; ΔV 为控制点标高调整量。

需注意的是临时压重量的影响矩阵计算时,需依据现场条件确定压重的布置范围,然后在有限元模型中施加均布荷载进行计算。

3.2 合龙口宽度调整

如采用温度合龙,可通过合龙段自身长度的改变来适应合龙时合龙口的宽度;采用几何合龙时,则通过顶推力的施加使合龙口宽度达到设计合龙段的长度。顶推力的计算可按如下步骤进行:

(1) 确定合龙时所需顶推位移

合龙时所需顶推位移主要与跨内主梁的累积梁长误差、合龙温度有关,主梁累积梁长误差须由悬臂施工中的几何测量值确定。方案设计时可暂不考虑主梁累积梁长误差,但合龙温度与基准温度不同引起的梁长变化应详细考虑。具体计算时,可在有限元模型中给合龙前一阶段给构体系施加体系温差,查看合龙口附近梁段前端的纵向位移,然后在此基础上按一定的安全储备确定所需顶推位移。

(2) 顶推力计算

主梁顶推力除需克服支座水平摩阻力、解除塔梁临时约束后的江、岸侧不平衡索力外,还需平衡由于主梁产生顶推位移引起的斜拉索索力、拉索角度变化而导致的不平衡水平索力重分配,此外可能还有索塔处横向抗风支座对纵桥向顶推产生的侧向摩阻力。

当顶推位移确定后,所需顶推力可通过试算确定,也可采用影响矩阵法求得。具体试算时可先不考虑支座摩阻力(摩阻力通过在有限元模型中查看支座上的反力,然后将其乘以相应支座摩阻系数求得),将塔梁临时约束解除,在设置顶推装置处施加一水平力进行计算,计算完成后查看合龙段附近梁段前端的纵向位移。如其未达到所需顶推位移,则加大顶推力进行计算,通过多次试算即可求出此水平力。然后,将此水平力与支座摩阻力叠加即是所求顶推力。顶推千斤顶选型时应留一定的富裕量。

4 几何合龙、温度合龙对成桥状态的影响

温度合龙时,要求合龙温度与基准温度相差不宜过大,否则在配切时因主梁发生过大的热变形使设计合龙段长度明显改变,导致主梁合龙后线形、内力偏离理想设计目标太大;几何合龙则无此要求。按照施工进度安排,嘉绍大桥主航道桥各合龙口合龙基本是在1月底、2月初。根据温度调查,近3年嘉绍地区12月、1月、2月的月平均气温为:12月6.1℃、1月5℃、2月6.5℃。假定合龙时温度为5℃,与基准温度相比温度降低了15℃,降幅较大,如采用温度合龙可能会对主桥成桥线形、内力产生较大影响。本文分别采用几何合龙、温度合龙这2种合龙方式对嘉绍大桥主航道桥进行合龙过程仿真计算分析。

计算时合龙口姿态调整采用临时调索的方式,不设置压重,调整合龙口附近最多2个索号的斜拉索。调整量计算采用第3节介绍的方法,合龙口标

高调整量为在合龙前一阶段给结构施加体系温差15℃时合龙段相邻梁段控制节点对应的位移值,暂不考虑梁段安装带来的标高误差;所需顶推位移为合龙口附近梁段前端的纵向位移,暂不考虑梁段安装带来的主梁累积梁长误差。表1列出了采用几何合龙、温度合龙时的施工步骤。从表1中可看出2种合龙方式的本质不同。

表 1 合龙施工步骤

Tab. 1 Closure construction steps		
步骤	温度合龙施工	几何合龙施工
1	将体系温度降低 15℃	将体系温度降低 15℃
2	视温度情况调整合龙口附近斜拉索索长	视温度情况调整合龙口附近斜拉索索长
3	临时锁定合龙口两侧梁段	临时锁定合龙口两侧梁段
4	根据合龙口宽度加工合龙段	解除塔梁临时约束
5	合龙	在相应顶推位置施加顶推力,调节合龙口宽度至设计宽度
6	—	合龙

顶推力计算时假定支座的摩阻系数按5%考虑。表2列出了合龙温度5℃时各合龙口所需顶推位移、顶推力及顶推作用位置。

表 2 合龙温度 5℃时各合龙口的顶推位移及所需顶推力

Tab. 2 Pushing displacements and required pushing forces at closures at 5℃ closure temperature

合龙口	顶推位移/cm	单幅顶推力/kN	顶推位置
Z2-Z3/Z8-Z9	4.0	1 210	Z2、Z9
Z3-Z4/Z7-Z8	7.5	2 135	Z3、Z8
Z4-Z5/Z6-Z7	7.5	1 670	Z5、Z6

计算表明:分别采用温度合龙工艺、几何合龙工艺进行合龙,成桥后主梁的应力水平、应力分布均较为接近;几何合龙后的主梁成桥标高更接近设计标高,与设计标高相差几乎为零,且在纵桥向上,由于通过顶推消除了温度效应,合龙段长度仍为设计长度,因此成桥后主梁长度与设计长度相比偏差为零,而温度合龙后主梁成桥标高与设计标高相比误差最大处近6cm,纵桥向上由于为适应合龙时合龙口的宽度需对合龙段进行现场重新配切,成桥后主梁长度与设计长度相比有近8cm的偏差。

5 嘉绍大桥几何合龙控制要点

主桥合龙施工时,需注意以下要点:

(1) 合龙口姿态观测

在正式几何合龙前,需分别对Z2-Z3/Z8-Z9合龙口、Z3-Z4/Z7-Z8合龙口、Z4-Z5/Z6-Z7

合龙口、Z5-Z6合龙口完成合龙口姿态48 h连续观测,得到不同温度环境下的合龙口形状及宽度。根据实时观测得到的合龙段端口形状、宽度及提前确定的合龙温度,确定合龙口的标高及合龙口宽度的调整量。确保在确定的合龙温度下,各索塔对应钢箱梁顶推到位后的合龙口形状与合龙段端口形状吻合满足匹配和施焊条件,从而完成各合龙口的顺利合龙。

(2) 合龙口轴线调整

合龙时如果合龙口两侧的主梁轴线存在偏差,须调整轴线使合龙口两侧主梁轴线一致。调整轴线可通过在合龙口两侧箱梁顶面设置交叉对拉装置实现,交叉对拉可采用手拉葫芦,如图4所示。

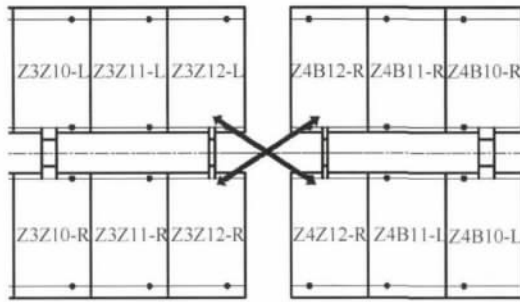


图4 合龙口轴线调整交叉对拉示意

Fig. 4 Schematic diagram of final closure axis adjustment through cross pulling

(3) 合龙口焊接顺序选择

目前对于合龙段入合龙口后的合龙缝焊接,一般有以下2种处理方式:①锁定合龙口,两侧合龙缝同时焊接,如图5所示。②不锁定合龙口,两侧合龙缝顺序焊接,如图6所示。

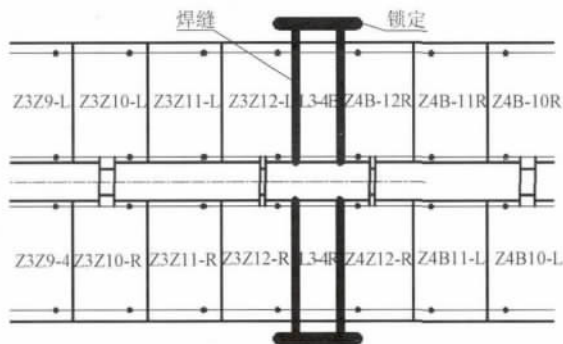


图5 锁定合龙口,同时焊接合龙缝

Fig. 5 Locking final closure and welding closure

嘉绍大桥主航道桥各合龙口合龙时恰好处于冬季,合龙时合龙温度较低且较稳定,合龙口宽度调

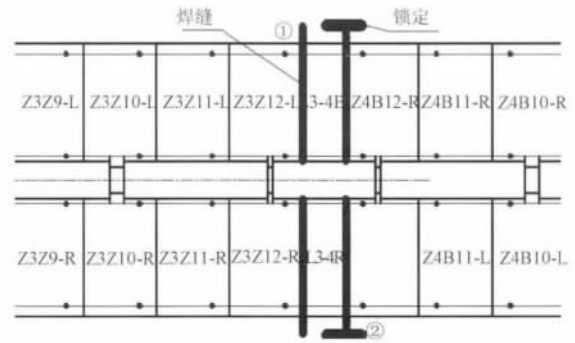


图6 两侧合龙缝顺序焊接

Fig. 6 Welding closure seams in turn at both sides

节力变化小,合龙口宽度较为稳定。因此各合龙段匹配完成后,应尽快锁定2条合龙缝并立即进行合龙口的焊缝施焊,避免因合龙口等待焊接过程中出现不稳定情况,造成合龙口缝宽变化。U肋的安装和焊接建议在与环焊缝焊接温度相似的条件下进行,以减小环焊缝的温度附加应力。

(4) 顶推限位装置的设置

为防止顶推时斜拉索在各塔处江、岸侧不平衡水平分力导致主梁前冲的风险,同时为了保证顶推合龙过程的安全性,还应在支座垫石与边跨侧牛腿间设置限位千斤顶及限位器和钢板,并在主梁顶推过程中逐步抽取限位钢板,防止千斤顶异常导致安全问题,限位装置如图7所示。

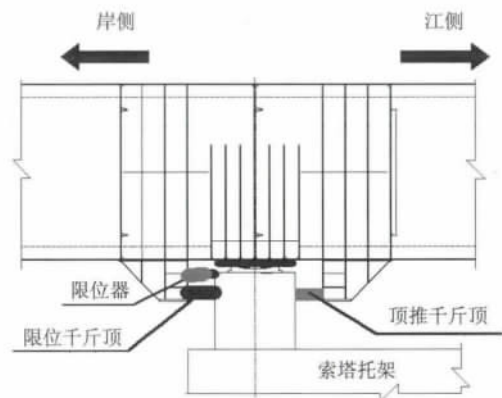


图7 主梁顶推千斤顶与限位装置示意

Fig. 7 Schematic diagram of girder pushing jack and limit device

(5) 支座垫石防护装置

主航道桥顶推合龙时,顶推千斤顶作用在垫石挡块上,如果顶推千斤顶与垫石的接触面积过小,则会造成垫石局部应力过大。所以,应在千斤顶的靠垫石端设置厚度不小于30 mm的垫板,防止垫石的局部产生承压裂缝。

6 合龙控制实施情况

嘉绍大桥主航道桥次中跨 Z4 - Z5/Z6 - Z7 合龙口于 2013 年 2 月 6 号顺利合龙, 全桥实现了贯通。合龙时, 主航道桥各合龙口临时调索量很小, 基本是每塔合龙侧只需调 1 个索号对应斜拉索, 未施加临时压重。图 8 ~ 图 9 为实测成桥线形 (已考虑测量温度与基准温度的差异) 及相应的线形误差图。从图 8 中可看出合龙后主梁线形平顺且与设计理论线形十分吻合, 实测线形与理论线形基本重合; 从图 9 中可看出成桥线形的误差很小, 都在 5 cm 之内, 远小于《规范》^[15] 中规定的限值; 此外主梁的累积梁长误差也未超过 5 cm 的限值, 实测塔偏、斜拉索索力、主梁应力均与理论结果吻合。

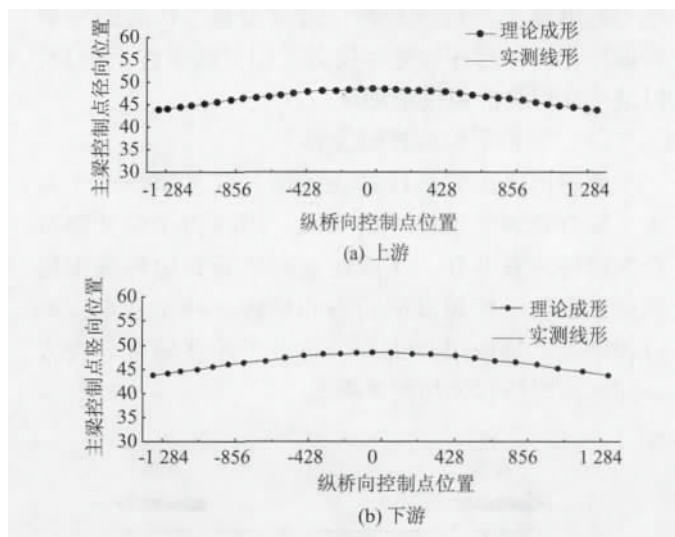


图 8 主梁成桥线形 (单位: m)

Fig. 8 Profile of main girder upon completion state (unit: m)

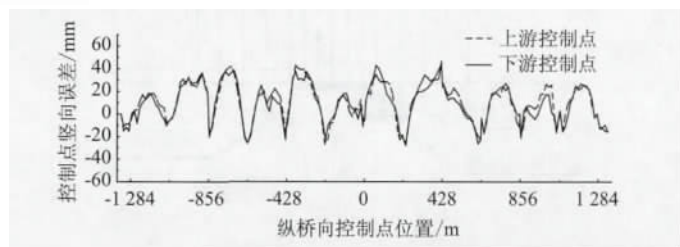


图 9 主梁高程误差

Fig. 9 Main girder elevation error

理想状态下如果斜拉桥各构件在制造与施工过程中不存在误差, 主梁采用几何合龙方式合龙后, 斜拉桥各构件都将恢复到设计基准状态下的初始无应力尺寸, 主梁成桥线形与设计线形之间偏差为零。实际中由于计算各构件无应力尺寸时采用的参数与其真值有出入, 制造、安装工艺存在误差, 安装时主梁焊接变形不可准确预知等因素影响, 已安装主

梁的实际无应力状态量与理论无应力状态量不可避免产生偏差, 从而使成桥线形与设计线形存在一定偏差, 因此施工中需对每一施工阶段进行有效地误差控制, 使成桥后主梁线形误差控制在允许范围内。

7 结论

嘉绍大桥主航道桥施工时采用全过程几何控制法进行控制, 各梁段在安装时均顺利匹配, 未出现配切梁段和高强螺栓孔扩孔的情况; 主梁合龙时采用几何合龙的方式, 合龙顺利。几何合龙技术可以消除合龙时的温度附加效应, 对环境条件基本无要求; 可以保证合龙段的设计长度不发生改变, 保证既定的合龙时间。主航道桥合龙顺利, 合龙时合龙口姿态调整工作量很小, 合龙后各项指标情况良好, 施工控制工作取得了良好成果, 为今后斜拉桥的合龙控制提供了借鉴。

参考文献:

References:

- [1] 葛耀君. 分段施工桥梁分析与控制 [M]. 北京: 人民交通大学出版社, 2003.
GE Yao - jun. Segmental Construction Analysis and Control of Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [2] 刘俊胜, 王宏, 王智龙, 等. 大跨径结合梁斜拉桥的主跨合龙技术 [J]. 公路交通技术, 2010, 26 (4): 67 - 70.
LIU Jun - sheng, WANG Hong, WANG Zhi - long, et al. Main Span Closure Technology in Large - span Combination Beam Cable - stayed Bridge [J]. Technology of Highway and Transport, 2010, 26 (4): 67 - 70.
- [3] 刘生奇, 蒋本俊. 武汉二七长江大桥跨中钢梁合龙施工技术 [J]. 桥梁建设, 2012, 42 (4): 7 - 13.
LIU Sheng - qi, JIANG Ben - jun. Construction Techniques for Closure of Midspan Steel Girder of Wuhan Erqi Changjiang River Bridge [J]. Bridge Construction, 2012, 42 (4): 7 - 13.
- [4] 田卫东, 柳俊峰. 合肥南淝河大桥主桥合龙施工技术 [J]. 桥梁建设, 2012, 42 (1): 126 - 130.
TIAN Wei - dong, LIU Jun - feng. Construction Techniques for Closure of Main Bridge of South Feihe River Bridge in Heifei [J]. Bridge Construction, 2012, 42 (1): 126 - 130.
- [5] 孟繁增. 多塔斜拉桥合龙方法及其影响研究分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

- MENG Fan - zeng. Study on Closure Scheme for Multi - pylon Cable - stayed Bridges and Its Influence on Structural Stage [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [6] 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.
- QIN Shun - quan. Bridge Construction Control: Theory of Unstressed State Control Method and Practice [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [7] 秦顺全. 分阶段施工桥梁的无应力状态控制法 [J]. 桥梁建设, 2008 (1): 8 - 14.
- QIN Shun - quan. Unstressed State Control Method for Bridges Constructed in Stages [J]. Bridge Construction, 2008 (1): 8 - 14.
- [8] 杨兴旺. 大跨度斜拉桥施工全过程非线性行为研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- YANG Xing - wang. Research on the Nonlinear Behavior of Long - span Cable - stayed Bridges Considering Overall Construction Process [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [9] 张清华、卜一之、李乔. 大跨度斜拉桥施工控制的研究进展 [C]//第二十届全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2012: 521 - 529.
- ZHANG Qing - hua, BU Yi - zhi, LI Qiao. Advances of Long - span Cable - stayed Bridge Construction Control [C]// Proceedings of 20th National Bridge Conference. Beijing: China Communications Press, 2012: 521 - 529.
- [10] 李乔、卜一之、张清华. 基于几何控制的全过程自适应施工控制系统研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42 (7): 69 - 77.
- LI Qiao, BU Yi - zhi, ZHANG Qing - hua. Whole - Procedure Adaptive Construction Control System Based on Geometry Control Method [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42 (7): 69 - 77.
- [11] 李乔、卜一之、张清华, 等. 大跨度斜拉桥施工全过程几何控制概论与应用 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2009.
- LI Qiao, BU Yi - zhi, ZHANG Qing - hua, et al. Introduction and Application of Whole - procedure Construction of Long - span Cable - stayed Bridge Based on Geometry Control Method [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2009.
- [12] 秦顺全. 无应力状态控制法斜拉桥安装计算的应用 [J]. 桥梁建设, 2008 (2): 13 - 16.
- QIN Shun - quan. Application of Unstressed State Control Method to Calculation for Erection of Cable - stayed Bridge [J]. Bridge Construction, 2008 (2): 13 - 16.
- [13] 梁鹏、肖汝成、徐岳. 超大跨度斜拉桥的安装构形与无应力构形 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26 (4): 49 - 53.
- LIANG Peng, XIAO Ru - cheng, XU Yue. Assembled Geometry and Unstrained Geometry of Super Long - span Cable - stayed Bridges [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26 (4): 49 - 53.
- [14] 张建民、肖汝成. 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.
- ZHANG Jian - min, XIAO Ru - cheng. Study on The Pre - arranged Angle of Girders in Construction State for a Thousand - meter Scale Cable - stayed Bridge [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2005, 22 (5): 618 - 622.
- [15] 嘉绍跨江大桥工程建设指挥部. 嘉绍大桥专用施工技术规范 [S]. 2009.
- Jiaying - Shaoxing Cross River Bridge Construction Headquarters. Special Construction Specification of Jiaying - Shaoxing Bridge [S]. 2009.

(上接第72页)

- [9] 冯秀峰. 混合配筋部分预应力混凝土梁疲劳性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- FENG Xiu - feng. Study on Fatigue Behavior of PPC Beams with Mixed Reinforcement [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [10] 金伟良. 腐蚀混凝土结构学 [D]. 北京: 科学出版社, 2011.
- JIN Wei - liang. Corroded Concrete Structures [D]. Beijing: Science Press, 2011.
- [11] SAIN T, CHANDRA K J M. Damage Indices for Failure of Concrete Beams under Fatigue [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75 (14): 4036 - 4051.
- [12] 潘华、邱洪兴. 基于损伤力学的混凝土疲劳损伤模型 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2006, 36 (4): 605 - 608.
- PAN Hua, QIU Hong - xing. Fatigue Model of Concrete Based on Continuum Damage Mechanics [J]. Journal of Southeast University: National Science Edition, 2006, 36 (4): 605 - 608.
- [13] 张伟平. 锈蚀钢筋应力 - 应变关系研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 5 (5): 586 - 592.
- ZHANG Wei - ping. Stress - strain Relationship of Corroded Steel Bars [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2006, 5 (5): 586 - 592.