

# 独塔混合梁斜拉桥合龙段施工控制技术研究

周争菊<sup>1</sup>, 杨聪<sup>2</sup>, 曾有艺<sup>2</sup>, 杨勇<sup>1</sup>

(1. 贵州省交通建设工程质量监督局, 贵州 贵阳 55000; 2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 以佛山市南海区跨东平水道特大桥为工程背景, 在分析精确合龙的技术难点的基础上, 着重从合龙线形及温度两方面对独塔混合梁斜拉桥采用缝接合龙法的施工控制技术进行研究, 以实现桥梁主跨的高精度合龙。

**关键词:** 桥梁; 混合梁斜拉桥; 合龙段; 施工控制

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)06-0099-03

大跨度斜拉桥合龙施工方法有顶推法、温度配切法和缝接合龙法 3 种, 其中缝接合龙法基于自适应无应力构形控制方法, 充分结合几何合龙法与梁段配切法的技术优势, 是实现快速、高精度主梁合龙的一种新颖合龙方法。该文以佛山市跨东平水道特大桥为例, 对该合龙施工控制技术进行研究。

## 1 工程背景

佛山市跨东平水道特大桥为空间单索面混合梁独塔斜拉桥, 采用塔、墩、梁固结体系, 跨径布置为 (35+260+50+64+66) m。主塔横桥向采用 A 字形, 因新交通对桥梁刚度要求高, 且拉索锚固处桥梁刚度相对较大, 斜拉索布置在新交通和公路之间。主梁采用分离式箱形截面, 边跨主梁为砼梁, 主跨主梁为钢箱梁, 钢混结合段在主跨内距主塔中心线 24 m 位置。

采用分离式主梁, 钢箱梁段采用扁平化流线形设计, 砼梁段采用预应力砼现浇制作。钢箱梁节段和节段之间通过焊接连接。钢箱梁采用 Q345qD 型钢材, 桥面板采用正交异性桥面板。主桥立面布置见图 1。

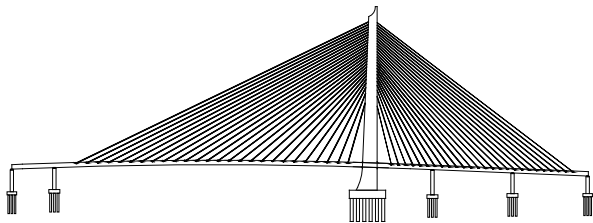


图 1 跨东平水道特大桥立面布置示意图

## 2 合龙段施工工艺及技术难点

该桥主桥钢箱梁主跨合龙采用缝接合龙法, 施

工流程为对称挂设 20<sup>#</sup> 索→测量 M18、M17、M16 梁段主边跨标高及索塔偏位, 以索力及标高进行控制, 以标高控制为主→复测标高→在支架上安装 M23、M22、M21 及 M19 梁段→复测调整 M21 和 M19 梁段两端标高(根据误差确定是否调整)→根据观测情况配切合龙段→架桥机起吊钢梁对位→调整标高、钢梁中轴线平面位置→临时匹配件连接→焊接码板→焊接腹板隔板及环焊缝→U 肋钻孔连接→焊缝探伤、整修→拆除临时匹配件及码板→架桥机松钩→完成合龙(见图 2)。

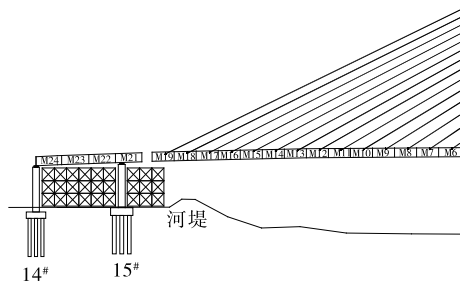


图 2 跨东平水道特大桥合龙段施工步骤

合龙段的精确合龙需解决以下技术难点: 1) 合龙口精确定位控制与中跨最后悬拼节段长度计算。斜拉桥主跨合龙施工期间, 结构悬臂长度最大, 而对于塔梁非对称斜拉桥系统, 合龙前必须仔细对整座桥梁尤其是悬臂端临近线形进行严格把控与结构内力监测, 分析塔、索、梁温度场与合龙口几何参数的对应关系。2) 合龙时的温度影响分析和控制。独塔斜拉桥合龙期间, 结构拥有较大单悬臂长度, 结构变形对温度变化极为敏感。需对合龙期间温度效应进行精准研究与控制, 确保成桥后线形与内力在合理区间内。3) 由于采用缝接合龙技术, 温度场对最后一条合龙缝的顶底板及上下游缝宽差的影响也是

需关注的一方面。

### 3 合龙施工关键几何参数

#### 3.1 合龙前悬臂线形控制

合龙段施工前,在顶、底板分别布置7、6个测点(见图3),连续测量合龙口M19~M21的间隙。同时测量M20节段相应点位的钢箱梁长度。测量时应考虑温度的影响,记录当时主梁的温度。

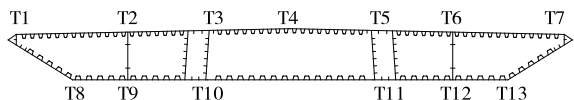


图3 跨东平水道特大桥钢箱梁主梁合龙口温度测点布置

连续24 h观测悬臂端顶板测点的标高,得到钢箱梁合龙口两侧标高(见图4、图5)。

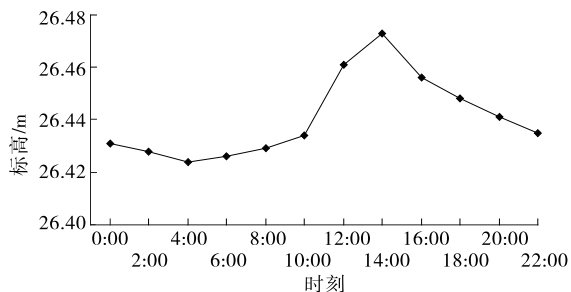


图4 合龙口M19侧T4测点的标高变化

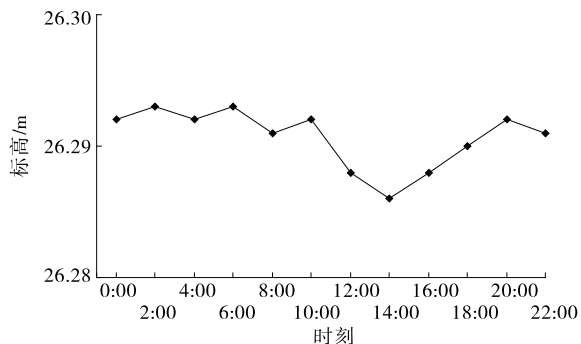


图5 合龙口M21侧T4测点的标高变化

#### 3.2 合龙温度分析

钢材热膨胀系数高且温度敏感性高,斜拉桥合龙口线形、斜拉索索力及主梁内力等合龙关键参数受温度影响较大,其中合龙口线形包括合龙口宽度、偏位、标高及转角等,关系到桥梁是否能精确合龙。对温度变化对结构的影响进行分析,是保证结构成桥后达到合理状态的必要措施。

该桥合龙在2017年1月初进行,为使合龙匹配精度达到要求,对最近3年1月份的温度进行统计,结果见表1。从表1可见,最近3年1月份的日最

高温平均值为22℃,日最低气温平均值为9℃。按照统计学理论,取22℃作为合龙施工的最优温度。该桥设计基准温度为15℃,合龙期间预测环境温度和设计温度至少相差7℃。

表1 合龙大气温度分析 ℃

时间	日最高平均气温	日最低平均气温
2015-01	20	11
2016-01	18	9
2017-01	22	12

#### 3.3 温度对合龙口标高的影响

该桥昼夜温差十分明显,且气候变化复杂。钢箱梁对温度敏感性高,温度变化是一个典型的具有非线性特点的动态变化过程,在温度等环境作用影响下,合龙口线形差及合龙口长度差会表现出复杂的动态波动特性,线形误差难以预测。合龙温度对合龙前最大悬臂状态桥梁前端标高的影响见表2。

表2 温度影响敏感性分析

温度变化/℃	DZ/mm		RY/( $\times 10^{-3}$ rad)	
	M19侧	M21侧	M19侧	M21侧
2	-2.2	-0.11	0.027	-0.003
4	-4.5	-0.14	0.054	-0.005
6	-6.5	-0.17	0.081	-0.008
8	-8.8	-0.18	0.107	-0.008
10	-10.8	-0.19	0.133	-0.009
12	-12.9	-0.20	0.161	-0.009

#### 3.4 合龙段配切长度确定

对合龙段两端已完成梁段进行持续观测,得到不同温度下合龙口两端标高、宽度及转角,据此预判合龙口两端已完成钢箱梁在最初设计温度状态下的总长,再对梁段进行制造参数确定。

##### 3.4.1 24 h温度影响观测

在M19、M21梁段精匹配后对结构温度场、前3段主梁标高索力、塔偏、合龙口长度等进行24 h观测,以确定合龙段M20梁段两端面的制造参数、适合合龙段匹配打码及临时约束解除施工的比较稳定温度场时段,分析温度变化和桥梁结构几何变形、物理量变化间的内在联系。

合龙段M20梁段端面的制造参数包括梁段端面的梁长切割量,梁段与M19、M21梁段预拼装时的拼装角度。由合龙口长度实测值与理论值的误差计算合龙段端面的梁长切割量,以塔侧悬臂主梁

M18、M17 及 M16 梁段的标高实测值和理论值误差确定合龙段梁段和 M19 梁段预拼装期间的最优拼装角度,以辅助墩侧主梁 M21、M22 及 M23 梁段的标高实测值和理论值的误差确定合龙段梁段和 M21 梁段预拼装期间的最优拼装角度。

3.4.2 合龙段的切割

合龙段梁段在设计尺寸基础上两端各预留 20 cm 加工余量,在该梁段正式吊装前,在接到合龙段配切指令后,根据已安装梁段的施工误差在温度影响消除后对合龙段进行精确切割。斜拉桥最后悬拼节段下料长度修正步骤:1) 根据天气情况推测合龙期间温度。2) 在钢箱梁焊接期间对悬臂端两侧测点坐标进行 24 或 36 h 观测,获得钢箱梁加权温度和测点坐标的对照关系,并利用最小二乘法拟合直线的待求数据,获得测点在各加权温度下的坐标值。3) 对基准温度下测点坐标进行观测,并与理论坐标值进行对比,获得基准温度下测点坐标误差。4) 计算推测合龙温度下悬臂长度修正值,将基准温度下测点坐标误差转变为推测合龙温度下测点坐标误差。5) 下料切割,完成梁段配切。

根据观测数据及对合龙段的分析,确定表 3 所示下料长度。合龙段梁顶、梁底测点布置见图 6, T2、T4 处纵断面见图 7。

表 3 合龙段配切尺寸 mm

位置	长度	位置	长度
$L_1$	4 420	$L_3$	4 423
$L_2$	4 430	$L_4$	4 425

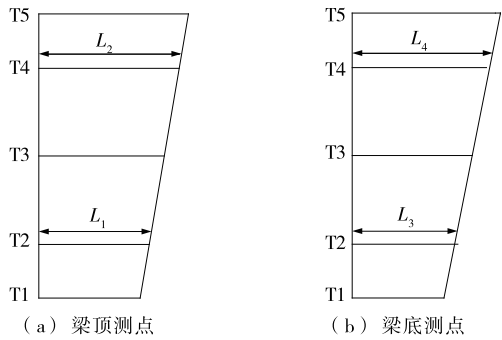


图 6 合龙段测点布置

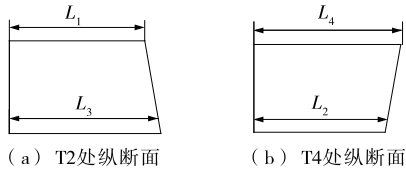


图 7 测点处纵断面示意图

4 全桥线形和内力

该桥合龙实际在 2017 年 1 月 18 日凌晨 1:00 左右进行,采用索力和标高进行标高控制。在起吊 M20 节段、M20 梁段下放完成、M26 焊接完成 3 种工况下,合龙过程中钢箱梁 M19、M21 段测点标高误差见表 4,各测点位置见图 8。

表 4 钢箱梁侧标高比较 m

工况	梁段	测点	实测标高	理论标高	差值
合龙段起吊	M19	T2	26.204	26.204	0
		T4	26.199	26.198	1
	M21	T2	26.062	26.055	7
		T4	26.054	26.055	-1
合龙段下放完成	M19	T2	27.206	26.204	2
		T4	27.202	26.198	4
	M21	T2	26.060	26.055	5
		T4	26.052	26.055	-3
合龙段焊接完成	M19	T2	26.201	26.204	-3
		T4	26.193	26.198	-6
	M21	T2	26.057	26.055	2
		T4	26.047	26.055	-8

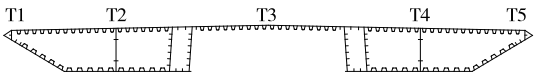


图 8 钢箱梁断面测点布置示意图

现场标高实际控制中以 T2、T4 测点的标高为主。通过测算,钢箱梁 M19、M21 节段在每种工况下测点 T2、T4 的实测标高和理论标高的误差均在 1 cm 以内,合龙精度高,主梁线形良好,合龙段下放顺利。合龙段下放完成后,将合龙段调整到位,先将 M19 侧固定,待温度回升、M21 侧焊缝宽度达到理想宽度后迅速打码固定,并解除边跨侧支座处约束。合龙后两侧焊缝宽度在 15 mm 左右,较理想。

5 结语

该文以佛山跨东平水道特大桥为例,介绍了缝接合龙法在独塔混合梁斜拉桥主跨合龙中的应用,首先进行合龙温度预测,再结合合龙口几何参数观测值确定合龙段配切参数,最后通过参数影响分析和标高索力调整实现合龙段缝接合龙。所采用的合

(下转第 105 页)

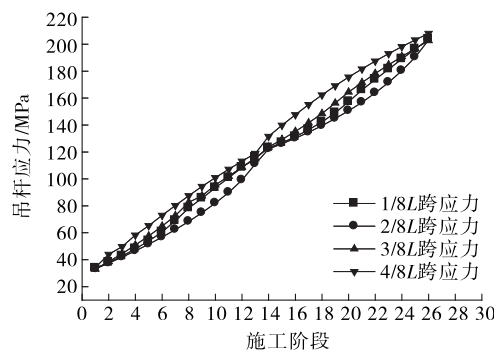


图 14 吊装方案 3 下吊杆应力

为 116.33 MPa;各截面位置位移变化较平缓,无明显折线;吊杆应力增加较均匀,且数值接近。

3.5 应力结果对比分析

3 种桥面板吊装方案下弦杆应力见表 2。

表 2 3 种桥面板吊装方案下弦杆应力极值 MPa

吊装方案	位置	各截面应力			
		1/8L	2/8L	3/8L	4/8L
		截面	截面	截面	截面
吊装方案 1	上弦杆	63.24	44.87	77.46	133.30
	下弦杆	-61.04	-40.68	-74.31	-140.92
吊装方案 2	上弦杆	116.26	167.61	55.21	58.50
	下弦杆	-130.94	-177.10	-50.69	-54.50
吊装方案 3	上弦杆	63.77	112.69	55.21	58.50
	下弦杆	-69.84	-116.33	-50.69	-54.50

由表 2 可知:1/8L 截面最大拉压应力出现在吊装方案 2,上弦杆 116.26 MPa,下弦杆为 130.94 MPa;2/8L 截面最大拉压应力出现在吊装方案 2,上弦杆 167.61 MPa,下弦杆为 177.10 MPa;3/8L 截面最大拉压应力出现在吊装方案 1,上弦杆 77.46 MPa,下弦杆为 74.31 MPa;4/8L 截面最大拉压应力出现在吊装方案 1,上弦杆 133.30 MPa,下弦杆

为 140.92 MPa。综合分析,吊装方案 3 下加劲梁应力控制效果最好。

4 结论

采用全连接、全吊装桥面板施工方案时,加劲梁节段之间已刚接,控制加劲梁上下弦杆的应力尤为重要。且石登桥二期荷载占全桥的 82%,更需确定合理的吊装方式,保证施工中结构的安全。3 种桥面板吊装方案中,在施工条件允许的条件下,方案 3 可同时展开 4 个工作面,有利于加快施工进度,但会增大施工投入;在结构应力控制上,方案 3 最优,方案 1 次之,方案 2 最差,在确定吊装方案后,施工中应注意实时监控重点截面,防止最不利截面发生破坏;在加劲梁线形控制上,方案 3 的整体线形较平缓,无明显折线出现,而方案 1、方案 2 下,分别有 2、3 个截面出现明显折线,说明部分截面容易发生应力集中现象。

参考文献:

- [1] 藤小竹.大跨度钢桁梁悬索桥关键问题研究[D].上海:同济大学,2008.
- [2] 蒋望.钢桁加劲梁悬索桥施工与成桥阶段仿真计算分析[D].长沙:长沙理工大学,2008.
- [3] 赵伟,胡兆同,吴文娟.钢桁梁悬索桥混凝土桥面板架设方案研究[J].中外公路,2011,31(6).
- [4] 李林.大跨度钢桁梁悬索桥施工控制关键技术研究[D].南京:东南大学,2017.
- [5] 王忠彬,沈锐利,唐茂林.悬索桥钢桁架加劲梁施工方法分析[J].石家庄铁道学院学报,2006,10(1).
- [6] 李毓龙.云南金东大桥悬索桥施工控制技术研究[D].南京:东南大学,2015.
- [7] Saafan S A.Theoretical analysis of suspension bridge [J].Journal of Engineering Mechanics,1966,94(4).

收稿日期:2018-03-19

\*\*\*\*\*

(上接第 101 页)

龙方法与工作程序对同类型桥梁具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] JTG/T D65-01-2007,公路斜拉桥设计细则[S].
- [2] 高涛.独塔混合梁斜拉桥施工控制技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2008.
- [3] 周绿野.独塔混合梁斜拉桥静力性能及参数敏感性分

析[D].长沙:长沙理工大学,2016.

- [4] 涂光亚,颜东煌,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(4).
- [5] 周晟.大跨径混合梁斜拉桥中跨合龙施工控制研究[D].长沙:长沙理工大学,2011.
- [6] 朱伟华.大跨径钢桁梁斜拉桥中跨合龙关键技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2016.

收稿日期:2018-07-09