

宁波三官堂大桥主桥钢梁中跨合龙施工技术

刘杰¹, 吕志林², 姜旭², 魏鹏飞¹

(1. 四川路桥华东建设有限责任公司, 四川 成都 610200; 2. 同济大学 土木工程学院)

摘要: 宁波三官堂大桥主桥为主跨 465 m 的三跨连续钢桁梁桥, 其跨径为目前同类型桥梁的世界第一。结合工程特点及现场情况, 钢梁安装采用从两端边跨向主跨架设, 跨中合龙的总体方案。该文针对宁波三官堂大桥跨度超大、合龙杆件多、安装精度要求高等难点, 对主桥中跨合龙特点进行详细分析, 阐述了各项合龙关键技术。根据合龙口的连续监测结果, 确定中跨合龙方案, 通过合理吊装和合龙口调节措施保证了合龙的精度与速度。

关键词: 城市桥梁; 连续钢桁梁; 安装; 合龙技术; 调整措施; 桥梁施工

1 工程概况

宁波三官堂大桥是连接高新区院士路与镇海区明海大道的主要过江通道, 南起高新区已建的江南路, 北接镇海现状中官西路, 全长约 3 000 m, 横穿甬江及 4 条规划河道。根据现场实际要求一跨过江, 主跨跨径达到 465 m, 且桥位临近庄桥机场, 施工过程中桥梁建筑高度也受到限制, 采用拱式或缆索承重体系桥梁方案时, 矢跨比或塔跨比不在常规取值范围内, 受力体系不合理, 经济性能较差。因此跨甬江主桥采用变高度连续钢桁梁桥, 跨径布置为 $160+465+160=785$ m(图 1),

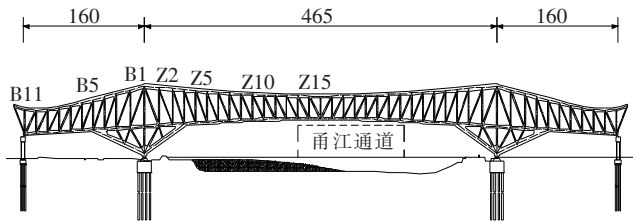


图 1 宁波三官堂大桥总体布置(单位:m)

主桁采用两片桁架组成, 采用变高度“N”形桁式。单片桁架包括上弦杆、下弦杆、竖腹杆、斜腹杆和 V 撑, 桁架节点采用整体式节点, 节段之间采用焊接连接。

桥面系采用正交异性钢桥面板, 板桁结合。

2 钢桁梁安装总体方案及合龙难点

宁波三官堂大桥上部结构钢梁采用板桁连接形式, 且中跨跨径大, 因此安装工艺及精度要求高, 施工难度大。根据桥梁结构的特点及桥址处的现场情况, 钢桁梁分 3 部位进行施工, 分别为南边跨及三角区支架法施工、中跨悬臂拼装施工和北边跨及三角区支架法施工。主桥钢桁梁先架设边跨再架设主跨。首先在边跨架设边跨及三角区钢桁梁安装支架、临时码头, 利用 300 t/50 t(主钩/副钩起重量)+300 t 龙门吊机按顺序分段完成三角区及其边跨钢桁梁的安装, 而钢桁梁中跨节段采用运输船运送至桥位安装点正下方, 利用 1 台 2×325 t 桥面吊机逐段对称安装, 悬臂拼装过程中跟踪测量各特征点位移及应力, 安装下一个节段

技术研究[J]. 中外公路, 2008(1).

[3] 李伟, 冯仲仁. 独塔混合梁斜拉桥合龙控制分析[J]. 中外公路, 2018(4).

[4] 杨永清, 叶浪, 吴德宝. 高低塔斜拉桥在温度作用下的静力特性研究[J]. 世界桥梁, 2017(5).

[5] 刘国坤, 颜东煌, 涂光亚. 混凝土斜拉桥施工控制中温度对主梁标高的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017(6).

[6] 颜东煌, 陈常松, 涂光亚. 混凝土斜拉桥施工控制温度影响及其现场修正[J]. 中国公路学报, 2006(4).

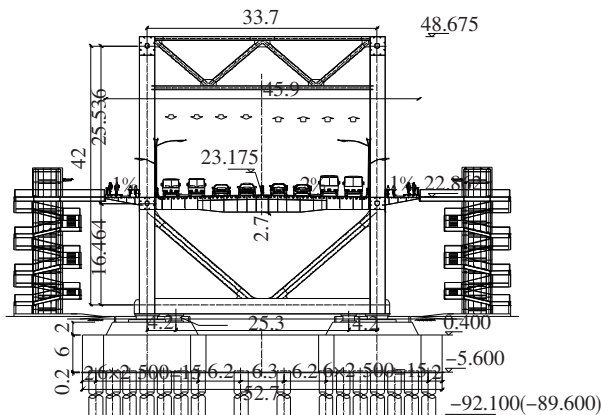
[7] 张永健, 刘旭政, 饶文真. 双肢人字形独塔斜拉桥整体温度效应影响研究[J]. 公路, 2017(2).

[8] 代传广, 李惠成, 时亮, 王兵见. 中央索面斜拉桥主梁施工过程温度影响研究[J]. 公路, 2017(6).

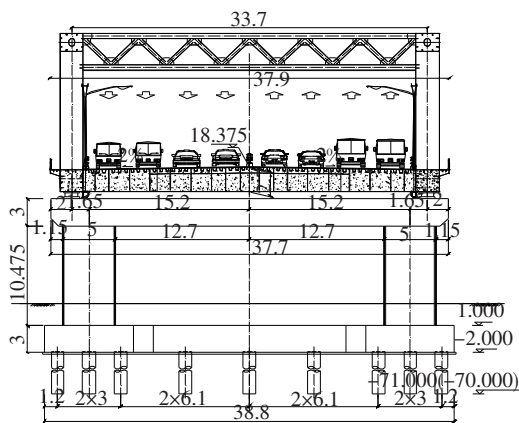
[9] 李克银, 吉小军. 斜拉桥施工控制中的温度影响分析[J]. 铁道工程学报, 2006(5).

前先完成本节段所有焊接,并经检测合格后拆除本节段临时杆件。最后采用 2 台 2×325 t 桁上吊机提升

中跨合龙段完成中跨合龙(图 2)。钢梁合龙后,顶升边墩横梁,恢复预偏至设计位置。



(a) 中墩支点处钢桁梁断面



(b) 边墩支点处钢桁梁断面

图 2 中跨合龙示意图(单位:m)

全桥钢梁共设 1 个合龙口,位于跨中节间。对于该项目工程,合龙施工存在以下难点:

(1) 合龙点较多,主桁杆件有 4 个合龙接点、斜撑杆件有 4 个合龙接点、此外还有桥面系。需在短时间内合龙,施工难度极大。

(2) 合龙点空间坐标的变化因素较多,钢桁梁在纵向(顺桥向)的长度偏差 X ,受温度、钢桁梁加工制造与安装偏差及风向的影响;横桥向的偏差 Y 受安装顺序、日照、吊索安装位置精度及风力的影响;竖向 Z 偏差,受安装荷载及悬臂挠度值的影响。在合龙调整时, X 、 Y 、 Z 互相影响,变化不定,较难掌控。

(3) 合龙精度要求高,属全焊合龙,在合龙时,合龙接口互相影响,难度较大。

(4) 杆件制造及安装误差的累计对合龙的影响较大,基本无法预测该值,从而导致合龙难度增加。

3 合龙控制要点

合龙是该桥成败与否的关键施工步骤,该步骤包括如下内容:

(1) 应力(内力)控制:尽可能减轻悬臂端的临时荷载。

(2) 线形控制:① 精确统计临时荷载重量、同步收集结构温度,为监控分析提供准确可靠数据;② 在悬臂拼装阶段根据各施工状态及荷载情况分析计算待安梁段的安装位置,以保证安装线形控制;③ 在中跨安装过程中,不断根据已安装梁段在安装过程中线形

的变化推导待安装梁段的安装位置,并与理论线形安装位置比对,保证安装梁段与已安梁段的线形按安装设计线形变化。

(3) 稳定性控制: ① 通过约束主墩支座位移、浇筑边跨压重混凝土和施加边墩锚固措施, 在边墩设置侧向挡块等综合措施保障钢桁梁整体稳定性; ② 通过杆件应力监控、悬臂端荷载控制, 防止杆件或结构局部失稳。

(4) 安全性控制: ① 通过杆件应力监控, 防止杆件应力超标; ② 通过多种全面的焊缝检测手段, 保障焊缝质量满足施工及设计要求; ③ 通过强化管理、精心施工, 防止削弱杆件截面面积及强度的施工行为。

其中对于分阶段施工的桥梁结构的内力及位移由以下因素确定:外荷载、结构体系、支承边界条件、单元无应力长度和曲率。该工程除外荷载外,其余因素已确定,因此减小施工过程中的外荷载是控制结构内力与位移的唯一途径,并且与结构的形成过程无关。

4 合龙施工关键技术

4.1 合龙前准备工作

(1) 为实现跨中钢桁梁的合龙条件, 从中跨钢桁梁安装开始, 每吊装一段都应将两岸钢桁梁调节到相同标高。钢桁梁的长短可以通过配切的方式确定, 轴线应避免出现偏位不一致的情况。安装完成后钢桁梁节段标高调节通过顶升或降低千斤顶行程调节。

(2) 合龙前观测采用 3 台全站仪对 8 个合龙口进

行连续观测,每个合龙口共 4 个观测点,连续观测时测量棱镜采用固定在合龙口的形式,全桥共布置 32 个合龙口连续观测棱镜。此外,其他拱节段单个节段上布置 1 个棱镜,用于全桥的线性测量,棱镜的布置位置为上弦杆腹板上。

(3) 合龙前对钢桁梁节段连续观测时间不少于 48 h(根据现场实际情况增加观测时间,循环观测时间控制为 1~2 h),通过测量数据绘制钢桁梁合龙口长度、

高程、轴向偏位随温度变化的关系曲线。结合关系曲线,找出温度、合龙口长度、高程、轴向偏位都相对稳定的时间段作为合龙时间,最终确定合龙段长度及合龙配切方案。

(4) 为保证合龙段焊接时因温度变化焊缝受外力影响,但不影响焊缝质量,考虑在上下弦顶板设置临时锁定牛腿。根据理论计算分析,可以得出合龙段在温升 20 ℃时的主要受力情况如表 1 所示。

表 1 合龙段受力计算结果(温升 20 ℃)

受力工况	轴力/kN		弯矩(-Y)/(kN·m)		弯矩(-Z)/(kN·m)		剪力(-Z)/kN	
	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦
合龙脱钩后	14 424	-5 987	-3 817	-3 048	-2 001	-1 761	369	-464
整体温升 20°	1 588	-79	-62	229	-242.2	141	-17	141
合龙脱钩+整体温升 20°	16 012	-6 066	-3 879	-2 819	-2 243.2	-1 620	352	-323

注:“-”表示受压。

由表 1 可知:钢桁梁合龙后(临时连接连好后),在结构整体温升 20 ℃的极端情况下,单个弦口最大轴向受力均小于±18 000 kN(考虑弯矩影响),根据设计,单个弦口布置 6 根 10.8 级 D80 高强螺杆,单根螺杆允许承受最大拉力约 4 000 kN,单根螺杆实际最大受力(仅考虑腹板及顶底板螺杆受力按 3 000 kN 考虑)为±500 kN,单根螺杆最大变形 $\Delta_1=FL/(EA)=2\times 10^{-4}$ mm,变形很小,满足临时锁定要求。此外,根据计算得到江北侧主墩支座反力最大值为 6 841 kN,因此临时水平约束按 7 000 kN 进行设计,可完全满足受力要求。

4.2 合龙吊装顺序

(1) 合龙段施工若继续采用整体吊装的施工方法,合龙时需要同时对位的合龙口较多,难以精确控制,所以考虑将整体吊装方式改为分部吊装合龙。吊装顺序采用先同时合龙左右幅两个桁片(含斜腹杆,但斜腹杆与下弦杆吊装时先不焊接,而是采用临时匹配件临时连接固定),再吊装焊接水平斜杆,最后吊装桥面系的顺序合龙。为保证合龙段的顺利吊装就位,上弦杆长度、斜腹杆悬臂端的顺桥向水平距离、下弦杆长度应依次增加,以使合龙口形成上小下大的“八”字形开口。

(2) 合龙段的吊装在温度下降且未降至当天最低温度(或次日凌晨)时进行,合龙段吊装到位后,先进行单侧(高新侧或江北侧)4 个接口的临时调整和连接,调整方法与悬臂节段的调整方法相同,待一侧 4 个弦口调整到位临时锁定后(如两侧 8 个口满足锁定条件

即全部进行临时锁定),等待已确定的合龙温度(监控指令),待另外一侧 4 个弦口的临时连接螺杆和螺栓完全对位后,立即进行最后 4 个合龙口的精确对位临时连接。如最后 4 个合龙口不能进行精确对位,个别断面存在偏差时,需进行临时调节。

4.3 合龙口调节措施

(1) 在钢结构初步吊装到位后,首先对钢结构进行轴线调节,调节方式采用千斤顶顶推的方式进行,每个合龙口配 2 台 100 t 横向调整螺旋千斤顶。首先对合龙段进行初测定位,确定轴线偏差量,确定调节量。在钢桁梁箱内底板焊接 T 形临时顶推牛腿,T 形牛腿轴线与合龙口焊缝夹角约 15°,此角度不应过大,过大不但调节效率低且对里程方向的调节影响较大。在临时牛腿之间架设千斤顶横向顶推钢箱,最终实现调节结果符合监控要求,腹板错边量不大于 10 mm。

(2) 调节好轴线后先安装部分螺杆作临时连接,在腹板内侧焊接限位挡板,将横向顶推千斤顶拆除。观察里程方向焊缝是否符合要求,若不符合则采用千斤顶和拉杆相结合的方式调节。利用临时连接牛腿架设纵向调节千斤顶,确定调节量。若需要向外顶,则放松钢拉杆利用千斤顶顶推;若需向内拉,则调节钢拉杆螺帽实现向内调节;最终焊缝宽度控制为 10 mm,误差为±5 mm。

(3) 钢拉杆临时固定(两颗对拧螺帽不拧紧,留有一定的活动量方便调节),对合龙段再次测量,通过起降缆索吊来实现对合龙段高程的调节。高程误差为±10 mm,但应保证合龙口接口处平顺。

4.4 合龙焊接顺序

- (1) 钢桁梁节段吊装就位后,同时开始左右幅上下弦杆环口处钢桁梁箱形对接焊缝,先从两侧对称焊接两侧腹板的对接焊缝,再从中间向两端对称焊接下、上盖板的对接焊缝。
- (2) 组装上下弦杆内加劲肋嵌补段,对称焊接嵌补对接及两侧角焊缝。
- (3) 焊接斜腹杆与钢桁梁节点间对接焊缝。

- (4) 焊接水平斜撑节段间对接焊缝。
- (5) 桥面、U 肋焊缝。
- (6) 焊接其他焊缝。

5 合龙施工流程及主要工序

根据该桥结构特点,综合上述关键工序,宁波三官堂大桥跨中合龙施工流程及主要工序分别见表 2 和图 3。

表 2 合龙段施工主要施工工序

施工工序	内容
线形调整 1	Z12 [#] 、Z13 [#] 和 Z14 [#] 钢桁梁定位时的线形调整,以保证 Z14 [#] 钢桁梁定位后合龙口两端线形满足合龙要求
线形调整 2	Z14 [#] 钢桁梁节段脱钩后,进行合龙前线形调整,若线形不满足合龙要求,则需要调整边墩下压高度以达到合龙目标线形
合龙口连续观测	对钢桁梁线形进行 48 h 连续观测,并在合适的时间、温度条件下测量合龙口形状
合龙口配切	完成合龙段的配切
焊接	合龙段吊装、匹配并完成焊接

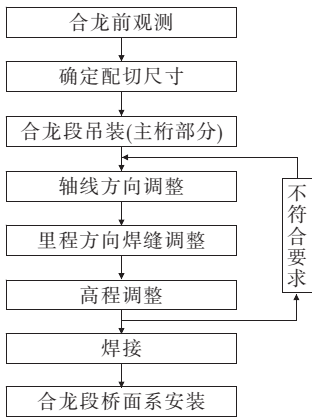


图 3 合龙施工流程图

6 结语

宁波三官堂大桥三跨连续钢桁梁采用从两端边跨向主跨架设,跨中合龙的总体方案。作为世界上最大跨径的连续钢桁梁,该桥具有跨径超大、合龙杆件多、安装精度要求高和桥位处大风天气等特点,使得该桥合龙施工难度大。在中跨合龙前,对钢桁梁安装进行

了监控监测,以使安装线形得到控制。合龙时通过合龙口连续观测、设置临时锁定、确定合理吊装顺序以及合龙口多项调节措施,实现了大桥的精确合龙。该桥钢桁梁合龙施工技术可供类似桥梁借鉴和参考。

参考文献:

- [1] 韩雯. 从宁波三官堂大桥方案构思浅谈桥梁景观[J]. 城市道桥与防洪,2018(5).
- [2] 姜洋. 宁波三官堂大桥桁架制造线形确定方法研究[J]. 城市道桥与防洪,2016(4).
- [3] 孙吉彪. 特大跨钢桁系杆拱桥施工过程控制关键技术研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2008.
- [4] 吴炜. 重庆千厮门嘉陵江大桥钢桁梁合龙施工与控制技术[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2014.
- [5] 季强. 公安长江公铁两用特大桥非通航孔钢桁梁架设技术[J]. 桥梁建设,2017(2).
- [6] 周仁忠,程多云,刘丹. 大跨钢桁拱桥悬臂施工法抗倾覆压重控制技术[J]. 中外公路,2016(6).
- [7] 李治学,李树喜,陈海波,等. 贵广(南广)高铁北江特大桥合龙施工关键技术[J]. 世界桥梁,2016(4).
- [8] 吴承凌,徐学西. 鸭绿江大桥主跨合龙技术[J]. 中外公路,2017(5).