

苏通大桥主桥中跨顶推辅助合龙技术

陈 鸣¹, 罗承斌¹, 吴启和^{1,2}, 张永涛^{1,2}, 游新鹏^{1,2}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 武汉 430014; 2. 交通部长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 武汉 430071)

[摘要] 通过综合国外顶推合龙工艺和国内温度配切合龙工艺优点, 提出了全新的顶推辅助合龙工艺, 并介绍了顶推辅助合龙工艺实施条件、关键施工参数和主要工艺措施的计算分析要点以及实施情况。

[关键词] 苏通大桥; 顶推辅助; 中跨合龙; 几何控制法; 施工工艺

[中图分类号] U445.4 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)03-0075-06

1 前言

苏通大桥主桥为双塔双索面钢箱梁斜拉桥, 跨径组合为 $2 \times 100 \text{ m} + 300 \text{ m} + 1\,088 \text{ m} + 300 \text{ m} + 2 \times 100 \text{ m}$ (见图 1), 居世界第一。主桥钢箱梁采用全焊扁平流线形结构, 含风嘴全宽 41 m , 中心线处高 4 m 。主梁采用桥面吊机悬臂法安装, 中跨合龙前, 主梁单悬臂长度达 540.8 m 。

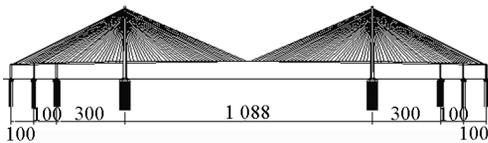


图 1 苏通大桥主桥结构布置图 (单位:m)

Fig. 1 The span layout of the main bridge of Sutong Bridge

由于结构长柔, 上部结构采用构件几何控制法进行施工控制, 要求施工中不改变构件几何尺寸和无应力线形。因此, 中跨合龙的要点是不改变合龙段尺寸和形态, 保证主梁局部线形平顺连接。

2 国内外中跨合龙方法

2.1 国外中跨合龙方法^[1,2]

国外钢箱梁斜拉桥中跨通常采用顶推合龙工

艺, 即合龙段按设计尺寸制造, 合龙前, 在合龙段或索塔位置设置千斤顶, 纵向顶推或拉移主梁改变合龙口长度。然后采用单侧桥面吊机起吊合龙段, 先匹配焊接一侧接缝, 然后回移主梁, 采用大型设备强制调整悬臂两侧高差和接缝顶底口宽度差, 最后接缝匹配焊接。国外最具代表性的日本多多罗大桥中跨合龙流程为: 顶推主梁向岸侧移动一起吊合龙段, 与一侧主梁匹配焊接→顶推主梁回移→调整接缝高差、顶底口宽度差, 匹配焊接。

2.2 国内中跨合龙方法^[3,4]

国内钢箱梁斜拉桥中跨通常采用温度配切合龙工艺, 即合龙段较设计尺寸超长制造。在合龙前, 设置劲性骨架限制悬臂两侧主梁相对变形, 并通过压重模拟合龙梁段起吊后的状态, 然后对合龙口长度实施连续监测, 根据实测稳定时段温度条件下的合龙口长度配切合龙段, 即通过改变合龙段长度实现中跨合龙。合龙施工时, 桥面吊机对称起吊合龙段, 同步卸除压重, 在夜间气温较低时嵌入合龙口, 两条合龙段接缝同步焊接, 完成中跨合龙。国内最具代表性的南京三桥中跨合龙流程为: 顶推主梁向岸侧移动一起吊合龙段, 与一侧主梁匹配焊接→顶推主梁回移→调整接缝高差、顶底口宽度差, 匹配焊接。

2.3 国内外中跨合龙方法比较

顶推合龙和温度配切合龙方法各有特点, 其对

[收稿日期] 2008-11-21

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目(2006BAG04B03)

[作者简介] 陈 鸣(1976-), 男, 贵州岑巩县人, 中交第二航务工程局有限公司高级工程师, 主要从事桥梁施工工作; E-mail: cmmc@vip.163.com

比情况见表1。

表1 顶推合龙与温度配切合龙工艺比较

Table 1 The comparison of closure process of fit temperatures closure technology and incremental launching technology

比较项目	顶推合龙	温度配切合龙
优点	a. 不改变合龙段尺寸,满足构件几何控制法要求;b. 合龙段两侧接缝异步匹配、焊接,结构受温度影响小,施工时间充裕;c. 不压重模拟合龙段吊装后的结构形态、不设置劲性骨架,施工环节少;d. 不进行线形连续观测,施工控制环节少	a. 通过压重模拟合龙段起吊后的结构形态,可提前对结构形态进行调整,减少了合龙段吊装后调整的难度和工作量;b. 不需要改变合龙口长度,没有释放临时固接产生的风险;c. 合龙段两条接缝同步焊接,可在较短时间内完成合龙工作
风险	a. 主梁需向岸侧移动,以改变合龙口尺寸,顶推施工可能引起主梁扭转;b. 顶推需要释放塔梁临时固接,结构变形释放后可能无法恢复;c. 随着结构跨度增大,顶推距离和顶推力也越大,施工难度和风险增大;d. 合龙段采用单侧桥面吊机起吊,合龙段接缝两侧主梁变形差大,匹配施工困难	a. 合龙段配切改变了构件尺寸和无应力线形,对成桥结构和受力存在一定影响;b. 结构受温度影响大,合龙段配切后可能无法嵌入合龙口,或接缝宽度过大而引起焊接质量问题;c. 两条接缝同步焊接,施工组织难度较大;d. 接缝匹配缺乏主动调整措施,质量和安全保障度较低

110 kN。

2)经计算分析,采用顶推合龙工艺,单侧桥面吊机起吊合龙段,合龙段接缝两侧主梁高差和顶底口宽度差,以及匹配所需的强制调整力见表2。

表2 接缝两侧变形与强制调整力

Table 2 Deformation difference of seams and the compulsory adjustment force

项目	接缝两侧变形差/mm	强制调整力
高差	618	628 kN
顶底口宽度差	41	47 000 kN·m

3)采用温度配切合龙工艺,在温度稳定的夜间,钢箱梁结构温度与环境温度大致相同,可达30℃,在这种温度条件下,合龙段的配切长度约为: $2 \times 540.8 \times 1.2 \times 10 \times 10^{-2} \approx 130$ mm。经分析,合龙段长度配切130 mm,对成桥结构线形和斜拉索索力影响见表3。

表3 合龙段配切130 mm对主梁和索塔线形、索力影响

Table 3 Influential size of alignment and influential force of cable due to the 130 mm cutting

主梁线形变化 DZ /mm	塔顶偏位(向主跨)		索力影响/kN
	DX /mm		
16	72		-30

4)根据对边跨大块梁段温度的连续监测可知,即使在夜间温度稳定时段,钢箱梁多天平均温度也存在较大变化,如图2所示,在22:00—7:00时段,钢箱梁两天的平均气温差可以达到约5℃。在这种温度条件下,合龙口尺寸在两天内的变化将达 $2 \times 540.8 \times 1.2 \times 5 \times 10^{-2} \approx 65$ mm。

因此,若采用温度配切合龙工艺,当通过合龙口长度和线形连续监测确定合龙段配切尺寸后,合龙段会因第二天温度变化而无法嵌入合龙口,或嵌入后,接缝过大而引起焊接质量问题。

3.2 顶推辅助合龙工艺的提出

通过上面的分析可知,对于苏通大桥,采用顶推和温度配切合龙工艺,主要存在以下风险和问题:

1)采用顶推工艺,主梁需要较大的顶推移动距离,不仅对结构线形和斜拉索索力存在影响,而且塔梁临时固接竖向索还需释放,临时固接释放对结构的影响无法预见。同时,单侧桥面吊机吊装合龙段,将造成合龙接缝两侧主梁较大的高差和顶底口宽度差,所需要的强制调整力巨大,接缝匹配困难。

3 顶推辅助合龙方法

3.1 顶推和温度配切合龙工艺分析

由表1可知国内外常规合龙方法均存在一定风险,对于苏通大桥中跨合龙,这些风险和对结构的影响随跨度增加而放大。

1)根据施工进度安排,苏通大桥中跨合龙在六月或七月,环境温度最高将达30℃,根据经验,钢结构日间最高温度一般为大于环境温度20℃,即达到50℃。在这种温度条件下,采用顶推合龙工艺,主梁单边顶推移动量至少需要 $540.8 \times 1.2 \times 30 \times 10^{-2} \approx 200$ mm,加上顶底板温差,顶推移动距离需要240 mm以上。经计算分析,顶推240 mm后,塔梁临时固接竖向索的安全系数小于2.0,对主梁线形、斜拉索索力和临时固结竖向索的影响均较大,主梁线形影响最高达65 mm,斜拉索索力影响最高达

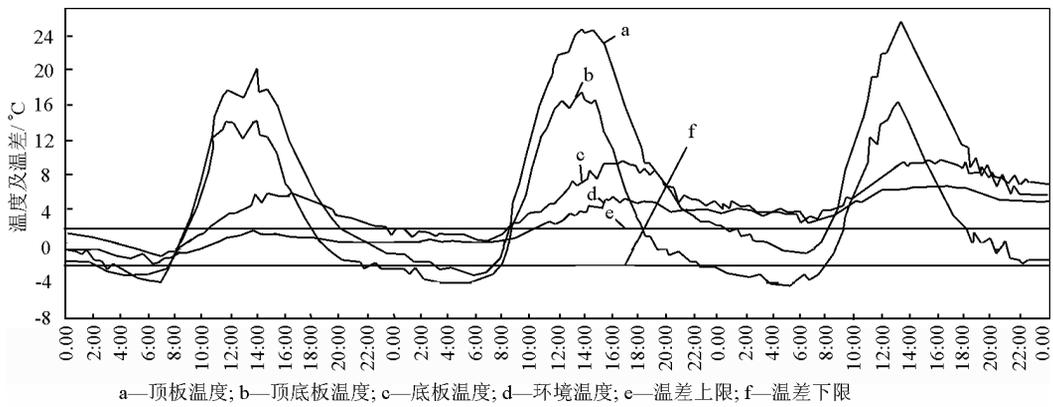


图2 钢箱梁温度变化曲线(晴天)

Fig.2 Variation curve of temperature against time of steel box girder (day time)

2)采用温度配切工艺,合龙段配切长度较大,对成桥塔偏不利影响较大。同时,多天温度变化对合龙口尺寸影响较大,合龙段可能无法嵌入合龙口,或嵌入后接缝宽度过大而引起焊接质量问题。

对于两种合龙工艺,这些风险都很难克服和回避。因此,综合顶推合龙和温度配切合龙的优缺点,提出全新的顶推辅助合龙工艺,其施工流程如下:

步骤1:第一次张拉 A34 和 J34 斜拉索。

步骤2:桥面吊机后移,拆除张拉平台,安装劲性骨架。

步骤3:桥面吊机前移至吊装合龙梁段位置。

步骤4:

1)第二次张拉 A34 和 J34 斜拉索;

2)合龙梁段临时替代荷载就位;

3)初步调整梁段局部线形、合龙口顶底宽和轴线;

4)劲性骨架在夜间焊成整体,主梁局部线形连续观测 12~24 h;

5)放松塔梁竖向临时固接索,将两侧梁段分别向岸侧移动。

步骤5:

1)合龙段长度修正;

2)桥面吊机抬吊合龙梁段,同时卸去合龙梁段临时替代压载。

步骤6:

1)在夜间合龙梁段进入合龙口,两侧梁段回移,依次与合龙梁段匹配;

2)焊接平台前移,两侧接缝同时焊接,日出之前解除塔梁临时固接。

顶推辅助合龙工艺的优点主要有如下6个方

面:

1)采用合龙口两侧桥面吊机抬吊合龙段,结构变形小,且两侧变形一致,合龙接缝调整量小;

2)在夜间将合龙段嵌入合龙口,可以减小主梁顶推移动量,对施工期结构线形和索力影响较小,同时,由于顶推量小,可以不释放塔梁临时固接竖向索;

3)采用临时压重模拟合龙段吊装后的结构状态,并进行局部线形的初步调整,可以减少合龙段吊装后的调整工作量,避免使用过大的强制调整装置;

4)采用劲性骨架限制主梁悬臂相对位移,可以减小风振影响,为顶推提供导向,并有利于开展合龙前主梁长度测量和局部线形的测量,为主梁长度修正和局部线形调整提供可靠数据;

5)顶推移动主梁调整合龙口尺寸,使该工艺具备了主动克服温度对结构不利影响的能力,合龙段嵌入合龙口,以及接缝匹配具有充足的时间;

6)没有改变合龙段尺寸和形态,成桥结构线形和受力不受影响。

3.3 顶推辅助合龙工艺实施控制条件

顶推辅助合龙主要包括合龙段嵌入合龙口、梁段匹配、接缝焊接三大工序阶段。由于合龙须在一夜间完成,因此,可以倒推出顶推辅助合龙各工序实施控制条件。

3.3.1 焊接时间

考虑到合龙段长度修正,合龙段一侧顶板 U 肋采用栓接,另一侧顶板 U 肋采用嵌补段焊接。根据每一个焊接工序分析合龙段接缝焊接所需时间为 8 h。

根据图 2,上午 8:00 以后,受日照影响,钢箱梁

温度大幅上升,将在梁体内产生温度应力,此时塔梁临时固接必须解除,为保证焊接质量和结构受力,这时钢箱梁主环缝应基本焊接完成。因此,合龙段接缝焊接最迟应在 24:00 以前开始。

3.3.2 匹配时间

根据图 2,20:00—次日 8:00,钢箱梁温度与环境温度基本一致,而且顶底板温差均小于 2℃,是合龙段接缝匹配的最佳时机。因为合龙段接缝焊接最迟应在 24:00 以前开始,所以,梁段匹配应在 20:00—24:00,共 4 h 内完成。

3.3.3 合龙段入合龙口时间

根据图 2,晴天 18:00 以后,钢箱梁温度即大幅下降,并与环境温度接近。考虑到接缝匹配须从 20:00 开始,因此,18:00 是合龙段嵌入合龙口的最佳时机,即合龙段嵌入合龙口有 2 h 时间,并以此时刻的钢箱梁温度作为确定顶推量的依据。顶推辅助合龙主要工序实施控制条件如表 4 所示。

表 4 主要工序实施控制条件

Table 4 Construction control conditions of working procedures

工序	时段	持续时间/h
合龙段入合龙口	18:00—20:00	2
合龙段匹配	20:00—24:00	4
合龙段接缝焊接	0:00—8:00	8

3.4 顶推辅助合龙关键施工参数

3.4.1 顶推量

18:00 是合龙段嵌入合龙口的最佳时机。6 月—7 月晴天条件下,钢箱梁在 18:00 的温度条件见表 5。

表 5 顶推时主梁温度条件

Table 5 Temperature conditions of girder for incremental launching

环境温度/℃	顶板温度/℃	底板温度/℃	顶底板温差/℃
35	35	37.5	5

顶推量由三部分组成。

- 1) 钢箱梁平均温度升高对合龙段长度的影响;
- 2) 钢箱梁顶底板温差对合龙段顶底板宽度的影响;
- 3) 合龙段嵌入合龙口预留工作缝(每侧 10 mm)。

根据上述温度条件,输入整体安装模型进行计算,得到顶推量参数(见表 6),即每侧顶推量为 146 mm。

表 6 顶推量计算

Table 6 Incremental launching distance

整体升温影响量/mm	温差对顶底板宽度影响量/mm	预留工作缝宽/mm	顶推量合计/mm
126	10	10	146

3.4.2 顶推力

顶推力包含两部分。

1) 支座摩擦力:即克服塔区竖向临时支座、边跨、辅助跨永久支座和临时支座的摩擦力。根据经验,支座摩擦系数偏安全取 0.1。为减小索塔区临时支座的反力,将临时固接竖向索力释放 50%。经分析,释放 50% 临时竖向索力后,辅助跨和边跨永久支座和塔区临时支座反力如表 7 所示,合计摩擦力为 5 042 kN。

表 7 支座反力与摩擦力

Table 7 Reaction forces and frictional forces of support

墩号	塔区	3 号墩	2 号墩	1 号墩
支座反力/kN	39 246	5 355	3 751	2 062
摩擦力/kN	3 925	536	375	206

2) 临时索索力:通过理论计算分析可知,顶推时为了克服临时固接纵向索索力变化而需要的顶推力为 10 399 kN。因此,顶推力为 5 042 + 10 399 = 15 441 kN。

3.5 顶推辅助合龙关键工艺措施

3.5.1 接缝顶底板宽度差调整措施

合龙梁段吊装后,由于施工误差和温度偏差客观存在,合龙段两侧接缝顶底板宽度必然存在一定偏差,产生的原因主要有:

1) 在悬臂前端设置合龙段替代压载,与合龙段荷载通过桥面吊机传递到主梁上对主梁线形的影响不同,导致接缝顶底板宽度偏差;

2) 由于合龙时钢箱梁顶底板温差的不同(根据图 2),导致接缝顶底板宽度偏差;

3) 由于静风的影响,悬臂两侧主梁向一侧整体变形,导致接缝上下游缝宽差异。

为了消除由上述原因造成的接缝顶底板宽度差,保证合龙段平顺匹配焊接,可采取以下调整措施进行调整。

1) 合龙段替代压载与桥面吊机反力对梁端转角影响不同,通过计算分析可知,由此产生的合龙口

顶底板宽度差超过 10 mm,需要的调整弯矩达 26 040 kN·m,采用在接缝顶底板布置千斤顶,所需调整力超过 6 510 t。因此,这部分偏差在合龙前,通过调整悬臂前端斜拉索予以调整。

2)对于温差引起的接缝顶底板宽度差,在接缝两侧顶底板上设置千斤顶张拉反力座,通过张拉引入弯矩调整缝宽差。在合龙段接缝两侧顶、底板,设计了 4 组强制调整装置,设计荷载为 650 kN/组,可满足 4 mm 缝宽差异调整要求。

3)对于风荷载引起的接缝上下游宽度差,在接缝上下游顶板上,靠腹板位置设置 200 t 千斤顶及张拉反力座,通过张拉引入弯矩可以调整 25 mm 缝宽差。

3.5.2 克服温度变化措施

即使在稳定的后半夜,钢箱梁平均温度和顶底板温差均在持续变化,由于塔梁临时固接尚未释放,温度变化必然导致结构内产生内力,因此,必须采取一定措施予以克服,从而保证焊缝稳定,确保焊接质量。利用马板结构,可以满足马缝期间温度变化要求。由于马缝时间较长,主梁温度已经发生变化,还考虑了一些辅助措施,如在马板前,在顶、底板止顶板处用 4 块钢板将合龙口两侧梁段焊接连接;马缝同时,分步进行焊缝打底施工。

4 中跨合龙实施情况

4.1 主要工序实施时间

中跨合龙于 6 月 5 日正式开始,6 月 9 日吊装合龙梁段,6 月 12 日完成合龙段全部接缝焊接。合龙期间的主要工序作业时间总计 50 h。由此可知,从主梁局部线形调整到塔梁临时固接解除,各主要工序基本按照理论分析和计划时间完成,说明理论分析合理、施工组织落实到位。

4.2 主要施工参数

4.2.1 顶推量

实际合龙时顶推量与理论计算存在一定差异,主要是由于以下两种因素影响:

1)进入合龙口时的主梁温度:在合龙前两天,对主梁在 18:00 时刻的温度进行了分析,表明此刻主梁最高温度约为 26 ℃,较理论计算的 37.5 ℃低,而顶底板温差为 5 ℃;

2)合龙阶段的索塔变形:合龙段吊装前,索塔在桥面高度处的纵向变形约为 -30 mm。

综合上述因素,主梁实际顶推量为 70 mm(理论

计算值为 146 mm)。

4.2.2 顶推力

主梁向岸侧顶推时,采用了 650 t 千斤顶,南北索塔共 16 台。主梁顶推拉移过程中北塔实测纵向索索力江侧合计 3 768 kN,岸侧合计 10 983 kN,均小于理论计算值。其中岸侧纵向索索力(10 983 kN)略大于不考虑支座摩擦力的纵向索理论计算索力(10 399 kN),其主要原因为:

1)顶推时,先放松江侧纵向索 20 mm,而实际纵向索此时的受力伸长量小于 10 mm,即放松 20 mm 时,江侧纵向索已经完全松弛。因此,理论计算顶推力应扣除江侧纵向索全部索力,即 6 870 kN;

2)根据修正后的顶推力,实际摩擦力约 4 113 kN,说明支座摩擦系数小于 0.1,且介于 0.05~0.1 之间。

4.3 接缝匹配实施情况

JH 与 SJ34 接缝宽度调整前底板止顶板处接缝差达 5 mm(此时顶板接缝已匹配)。采取措施调整后,底板止顶板处接缝宽差约 1 mm,匹配良好。

对于 JH 与 SJ34 接缝上下游宽度差,由于风的影响,调整前上游腹板处缝宽大于下游腹板处缝宽 8 mm,在止顶板处表现为 5 mm,采用 100 t 千斤顶在上游腹板处张拉调整后,止顶板处残余缝宽差小于 1 mm。

5 结语

1)顶推辅助合龙工艺综合了顶推合龙和温度配切合龙工艺的优点,对成桥结构线形和受力没有不利影响,满足构件几何控制法要求;

2)顶推辅助合龙实施条件和主要施工参数通过理论分析确定,并通过实践证明了其可靠性和合理性;

3)对于施工中可能面临的风险,通过详细计算分析确定了控制措施,有效控制了施工中的风险,克服了对结构的不利影响,并在施工中得到体现,中跨合龙施工始终处于受控状态。

参考文献

- [1] 李 勇. 湛江海湾大桥钢箱梁安装施工[J]. 广东公路交通, 2006,32(2):33-36
- [2] 沈 斌,谢发祥. 南京长江第三大桥钢箱梁桥面吊机及梁段吊装工程[J]. 世界桥梁,2006,34(3):19-22
- [3] 张 军. 安庆长江公路大桥钢箱梁安装技术[J]. 中国公路建设市场,2006,30(1):24-27
- [4] 毛志坚. 甬石大桥钢箱梁施工[J]. 公路,1998,22(3):8-12

Assistant pullback technique for main span closure of Sutong Bridge

Chen Ming¹, Luo Chengbin¹, Wu Qihe^{1,2},
Zhang Yongtao^{1,2}, You Xinpeng^{1,2}

(1. CCCC-Second Harbour Engineering Company Limited, Wuhan 430014, China;

2. Key Lab of Large-span Bridge Construction Technology, Ministry of Communications, PRC, Wuhan 430071, China)

[Abstract] By abstracting the advantage of the pullback method abroad and the domestic temperature-cutting method, a new assistant pullback method is put forward and brought into practice actually. In this paper, the analysis key point of practice conditions, key parameter of practice, main measures of the method and the performance are introduced.

[Key words] Sutong Bridge; assistant pullback; middle span closure; geometric control method; construction technology

(上接 19 页)

Sutong Bridge—a cable-stayed bridge with main span of 1 088 meters

You Qingzhong¹, He Ping¹, Dong Xuewu¹,
Zhang Xigang², Wu Shouchang¹

(1. Jiangsu Provincial Sutong Bridge Construction Commanding Department, Nanjing 210006, China; 2. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

[Abstract] In this paper, design and construction concepts are briefly presented. Furthermore, key technologies and innovative achievements are summarized mainly on piled foundation bearing capacity analysis, river bed scour protection and monitoring, superstructure wind-resistance study, mid-span closure method as well as long cantilever structure construction control.

[Key words] Sutong cable-stayed bridge; foundation; pylon; steel box girder; cable stay; construction control