

鄂东大桥混合梁斜拉桥合龙技术

刘明虎¹, 谭 皓¹, 徐国平¹, 赵灿晖²

(1. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088; 2. 西南交通大学土木学院, 成都 610031)

[摘要] 结合世界第二混合梁斜拉桥——主跨 926 m 的鄂东大桥, 研究了大跨径混合梁斜拉桥中跨合龙方案的影响因素及关键技术, 确定采用加载合龙方案。加载合龙方法具有较好的温度适应性, 对成桥结构线形和受力影响很小, 满足无应力施工控制方法的要求, 适用于大跨径混合梁斜拉桥。研究成果及实践经验对同类型桥梁具有借鉴指导意义。

[关键词] 鄂东大桥; 混合梁斜拉桥; 合龙技术; 加载合龙; 无应力状态控制法

[中图分类号] U445.4 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)10-0099-06

1 前言

混合梁斜拉桥集钢梁和混凝土梁各自优点于一体, 满足了大跨度、建设条件及经济性的要求, 在千米级乃至更大跨度斜拉桥方案中具有独特的竞争优势^[1]。我国混合梁斜拉桥在过去 15 年间表现出跨度的跨越式发展(见图 1), 中跨合龙是斜拉桥建设过程的关键环节。文章对鄂东大桥主桥混合梁斜拉桥中跨合龙方案及关键技术进行了研究。大桥位于湖北省黄石市, 主桥采用桥跨布置为 $(3 \times 67.5 + 72.5 + 926 + 72.5 + 3 \times 67.5)$ m 的连续半飘浮双塔混合梁斜拉桥。主梁中跨采用钢箱梁, 边跨采用混凝土箱梁, 结合部设置在索塔向中跨侧 12.5 m 处。边跨采用支架分段逐跨现浇施工, 中跨采用悬臂拼装施工。

2 斜拉桥合龙方案

大跨度斜拉桥合龙方案的选择与其施工监控理论密不可分。目前大跨度斜拉桥施工控制通常采用以下两种方法: a. 传统的索力—主梁标高双控法; b. 无应力控制法(几何控制法), 该法可消除施工临时荷载及温度的影响, 并在理论上能满足多工序同

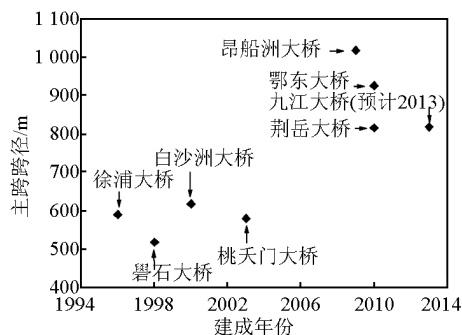


图 1 中国大跨混合梁斜拉桥

Fig. 1 Long span hybrid girder cable stayed bridges in China

步作业^[2-5]。

对于中跨为钢梁的斜拉桥(全钢梁或混合梁), 通常有两种合龙方案: 其一为配切合龙, 即现场即时配切合龙段以适应中跨合龙口宽度; 其二为加载合龙, 即合龙段按设计理论长度制造, 合龙时根据实际温度, 通过施加外力顶推或牵拉来调整合龙口宽度以喂入合龙段^[6]。顶推或牵拉可以在合龙口梁端实施, 也可以在索塔下横梁处实施。通过刚性构件加载为顶推, 通过柔性构件加载为牵拉。鄂东大桥通过索塔下横梁与主梁之间的刚性构件进行加载,

[收稿日期] 2010-11-04

[作者简介] 刘明虎(1971—), 男, 湖北潜江市人, 中交公路规划设计院教授级高级工程师, 主要从事大跨桥梁设计及研究工作; E-mail: liuminghu@vip.sina.com

为方便起见,以下加载均称为顶推。上述两种合龙方案的比较如表1所示。

表1 中跨合龙方案比较

Table 1 Comparison of mid span closure solutions

合龙方案	主要实施流程	特点	风险
配切合龙	a→b→c→e→f	通过合龙口连续观测,确定合龙段安装长度;在不解除塔梁临时约束条件下实现中跨合龙	合龙段配切改变构件无应力形状,对成桥线形及内力存在一定影响;受温度影响较大,存在合龙段无法嵌入合龙口或焊缝宽度过大时难以主动调整等问题
加载合龙	a→b→d→e→f	不改变合龙段尺寸,通过合龙前主梁的整体顶推实现合龙口宽度调节;合龙时的结构温度对成桥后结构体系影响小;能较好地符合无应力控制理论	主梁顶推施工需释放塔梁临时约束,结构顶推变位后不易恢复;随着跨径增大,顶推力及限位力相应增大,需谨慎考察结构细部的承载能力

表1中,a为合龙口临时劲性骨架锁定(顺桥向自由),合龙口压重;b为合龙口长度连续观测;c为根据实测稳定时段温度条件下的合龙口长度实施合龙段配切;d为顶推主梁,至合龙口宽度满足设计要求;e为起吊合龙段,稳定时段温度条件下嵌入合龙口;f为焊接合龙段两端焊缝,实现合龙。对于两种不同的合龙方案,相同实施流程的作用和工艺略有差别。分析表明,若忽略结构安装误差,两种合龙方案的最大差异在于对合龙时温度的适应性上。理论上,若合龙时温度与设计基准温度一致,且合龙后一段时间内温度保持稳定,则两种合龙方案并无本质区别。

3 鄂东大桥合龙方案研究

3.1 结构受力及构造特点

鄂东大桥主梁结构特点与全钢主梁大跨度斜拉

桥存在以下区别:

1)边跨混凝土梁在提供较大刚度的同时,也提供了较大的重量,保证边跨压重。

2)边、中跨主梁的力学行为存在一定的独立性。边、中跨索力水平分量的合力不平衡。经总体受力计算分析,为保证合理的成桥状态,须使施工期拉索水平分量的合力指向中跨侧。

3)塔梁临时约束在构造上与全钢梁斜拉桥不同(见图2)。鄂东大桥由于边跨混凝土梁伸入中跨,塔梁临时约束可以利用为运营期受力而设置的混凝土限位挡块,在其间填塞临时填充物来实现,构造简单、经济。

4)边跨采用排架法施工,在中跨合龙前形成了多点支承小跨径主梁。

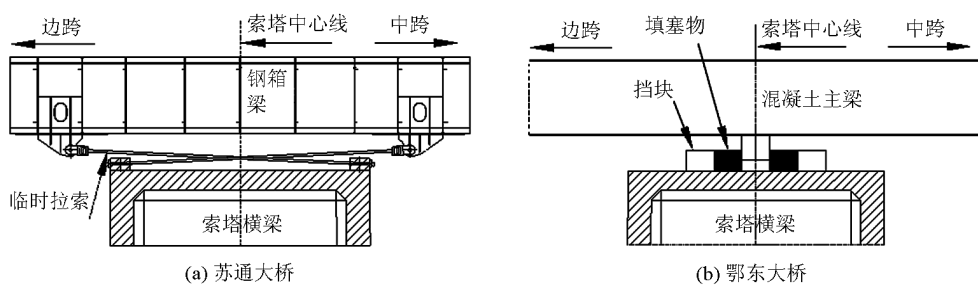


图2 塔梁临时约束构造比较(仅纵向)

Fig. 2 Comparison of temporary restricting structures between tower and beam (only longitudinal)

3.2 影响因素计算分析

合龙影响因素计算分析时,恒载及温度作用下的桥梁各部受力大小及状态需通过全桥总体静力计算获得。全桥总体静力计算采用TDV-RM2006空

间杆系非线性程序,以理论竖曲线为基准进行结构离散,考虑斜拉索的垂度效应(采用多单元法,将每根斜拉索分成8个单元来模拟拉索在荷载作用下的曲线构形)、大位移效应和P-delta效应,按照施工

进程,分 331 个施工阶段进行模拟,全面分析结构各阶段直至合龙工况的内力和位移情况。全桥分析模型见图 3。

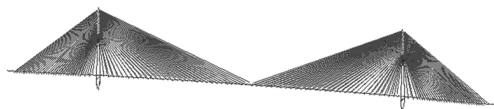


图 3 RM2006 全桥分析模型

Fig. 3 RM2006 whole bridge analysis model

结构计算边界条件为:主梁与过渡墩之间纵向自由、竖向及横向约束;主梁与辅助墩纵向及横向自由、竖向约束;索塔横梁与主梁之间在合龙前整个施工期间三向线位移约束、平面内及横桥向转角约束,在合龙实施顶推时解除纵向约束;塔底采用模拟实际基础刚度的弹性约束。

1) 温度。计算分析表明:不考虑施工误差及焊缝预留量时,主梁在不同温度情况下,合龙口的顶推变位量(合龙段配切量)如图 4 所示。可见,当合龙温度低于 20 °C (设计基准温度)时,主梁需向中跨侧顶推位移;高于 20 °C 时,需向边跨侧顶推位移;顶推位移量与合龙温度基本呈线性关系。对于加载合龙方案,通过合龙口宽度的调整,抵消了部分合龙时气温的影响,合龙后的结构状态与设计基准温度时接近;对于配切合龙方案,则在主梁中存留了温度的影响,合龙后的结构状态与设计基准温度时相差较大。不同合龙温度时两种方案对成桥结构线形的影响见图 5。

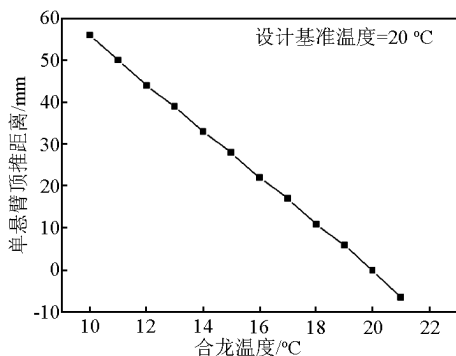
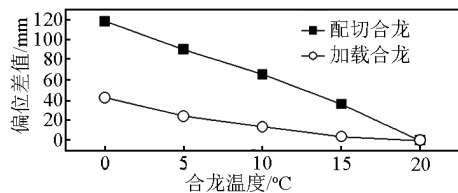


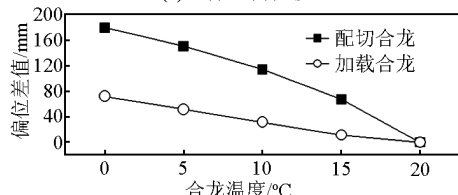
图 4 单侧主梁加载位移量

Fig. 4 Displacement due to loading on completed single side of girder

2) 顶推力。采用配切合龙方案时,主梁不需顶推。采用加载合龙方案,则必须对主梁主动施加外力。要确定顶推力的大小,需首先分析主梁顶推时的受力状态;在顶推时,主梁主要受到边跨支座的摩



(a) 主梁竖向位移



(b) 塔顶纵向水平位移

图 5 合龙方案对成桥结构线形影响比较

Fig. 5 Comparison of impact on structure alignment of bridge by closure solutions

阻力、中边跨拉索不平衡力的水平向合力以及顶推力;其中支座摩阻力是阻止主梁运动的,对于顶推不利。摩擦力特性决定了支座的静摩擦系数与动摩擦系数存在较大的差异。根据相关单位提供的试验资料,鄂东大桥所使用的球形钢支座的摩擦系数见表 2。根据全桥总体计算支反力结果得到顶推启动时的静摩阻力最大值为 6 262 kN。

表 2 摩擦系数试验值

Table 2 Friction coefficient test value

正应力 /MPa	初始静摩擦系数/%	动摩擦系数/%	稳定后静摩擦系数/%
12	5.50	3.52	3.2
18	4.90	6.06	2.89
24	4.26	2.85	2.52

由于中、边跨索力不同,主梁受到中、边跨拉索不平衡力的水平向合力。以向中跨加载顶推为例:在刚开始顶推时,此力的方向向中跨为 4 756 kN,对主梁顶推有利。但随着顶推位移量的增大,由于拉索角度的变化,此力的方向会反向(见图 6)。

以湖北黄石地区 3 月下旬平均最低气温 13.5 °C 为例计算主梁顶推力。该温度条件下,不考虑主梁施工误差及截面温差造成的缝宽差异,主梁需向中跨侧顶推位移 36 mm。根据上述分析,得到主梁顶推启动力及顶推过程中的最大力。考虑分级加载过程中存在稳载过程,支座摩阻力均按初始静摩擦系数取用。由表 3 计算顶推力可见,顶推初始状态并不是顶推设备提供最大顶推力的工况,随着主梁逐步向中跨侧移动,顶推力逐渐增大直至

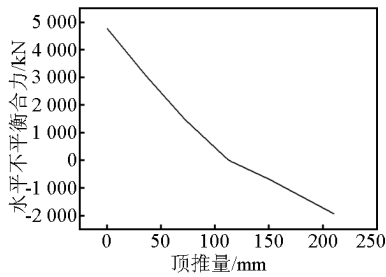


图6 顶推位移量与拉索不平衡力的关系

Fig. 6 Relation between jacking displacement and unbalanced force of cable

3 190 kN。应注意,摩擦系数不可避免地存在较大离散性^[7],若取用较小的摩擦系数,则存在仅边中跨不平衡索力就能使主梁移动的情况。因此,在顶推的实施过程中,应采取适当限位措施防止主梁突然向中跨前冲。

表3 计算顶推力

Table 3 Calculation of jacking force

顶推启动力/kN	顶推过程最大力/kN
-(支座摩阻力 + 拉索不平衡力) =	-(支座摩阻力 + 拉索不平衡力) =
-(-6 262 + 4 756) = 1 506	-(-6 262 + 3 072) = 3 190

此外,考虑顶推时主梁温度超过设计基准温度的情况,此时主梁需向边跨侧顶推,则在顶推启动时需要提供 11 018 kN 的顶推力以克服支座摩阻力和不平衡索力的合力(仅为理论预测分析,实际由于顶推力较大而难以实施,故对于本桥,选择合龙温度时应严格杜绝高于设计基准温度的情形)。

3) 构件局部承载能力。在合龙实施过程中,不同的方案对结构局部的承载能力要求有所不同。如配切合龙时,考虑结构的稳定性及安全性,在合龙后解除塔梁临时约束,则应考虑环焊缝匹配到施焊完毕时间段内的温度变化造成的附加力,明确其传力途径最终落实的构件。如采用加载合龙时,根据不同的温度情况计算施工过程中所需提供的最大顶推力,并明确顶推力作用的构件,应充分保证其承载能力。

4 鄂东大桥合龙技术实践

根据施工进度计划,鄂东大桥预计合龙时间为3月底或4月初,为季节转换时期,由统计分析,存在昼夜温差大、日平均气温分布较为离散的特点。经综合考虑,确定采用加载合龙方案。

4.1 实施流程

中跨最后4对斜拉索张拉至合龙口调整线形所需的合龙索长,边跨侧相应斜拉索张拉至设计第二次张拉索长并施加主梁自重等代临时配重→拆除边跨主梁所有落地排架支墩→桥面吊机前移至吊装合龙段位置→初步调整合龙口形状及局部梁段线形→进行48 h合龙口宽度的连续观测以确定施工累计梁长误差及合龙段喂入合龙口时机→合龙口两侧劲性骨架锁定横向及竖向,顺桥向仍为放松→起吊合龙段,卸除临时配重→在温度合适时喂入合龙口→解除塔梁临时约束,合龙段单侧匹配→实施主梁顶推→主梁顶推到位,合龙段两侧匹配完成→劲性骨架顺桥向锁定→合龙段两端环焊缝施焊。至此完成力学意义上的合龙,后续流程不赘述。

4.2 关键技术措施

1) 合龙口高差及顶底口宽度差调整。由于本桥施工监控采用无应力控制方法,在各构件的制造、安装均纳入该控制体系的前提下,施工期的索力增量及临时荷载的变化,理论上对大桥成桥后无影响。因此,合龙口高差及顶底口宽度差的调整,采用调整中跨最后4对斜拉索索力及施加局部梁段配重实现;合龙段两端环口的局部变形采用马板马平。在合龙完成后卸除局部梁段配重并将斜拉索的索长调整至设计第二次张拉索长。

2) 顶推的实施及塔梁临时约束解除。主梁的主顶推点设置在塔梁临时约束的限位挡块处,在上、下游挡块处设置同步千斤顶进行顶推(见图7)。从图7可见,中、边跨侧均安装了千斤顶,并设置由抽插钢片构成的限位装置。目的在于防止主梁顶推运动后支座摩阻力由静摩阻转化为动摩阻造成的主梁前冲的可能。即采用限位千斤顶置换塔梁临时约束装置的临时填充物;按照连续观测的结果确定顶推量并采用顶推千斤顶分级实施,在每一级顶推过程中,限位千斤顶逐级放松,同时抽出限位钢片。将解除塔梁临时约束的过程融合入顶推实施过程中,顶推完成的同时塔梁约束装置的解除也同步完成,从而减小施工期的风险。

3) 合龙段喂入合龙口及匹配焊接时机。合龙口一昼夜间梁温的变化见图8,测温时为阴有小雨的天气;并根据短期天气预报,在合龙实施过程中仍将持续阴天。由温度统计情况可见,梁温最大值出现在下午16:00左右,最高温度不超过20℃,低于设计基准温度。同时可见,即便是阴天,在该时段主

梁的顶、底板温差仍超过 4°C ,主梁昼夜的平均温差超过 7°C 。由上述温度分析,因日最高梁温低于设计基准温度,只需留出合龙段两端的导向操作空间,合龙段即能顺利喂入合龙口。 $18:00$ 以后,主梁顶底板温差小于 3°C ,可以保证合龙段的匹配。由于昼夜温差相对较大,因此,需在次日上午 $8:00$ 前完成合龙段环缝焊接。

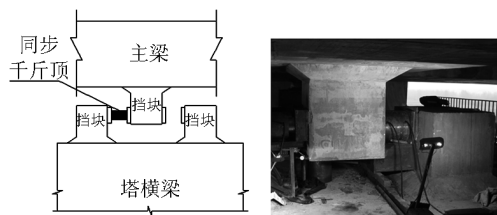


图7 主顶推点布置

Fig.7 Arrangement of main jacking point

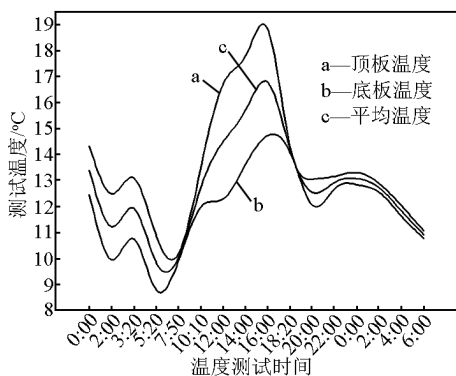


图8 钢箱梁温度变化曲线

Fig.8 Temperature variation curve of steel box girder

4) 劲性骨架的设置。合龙口劲性骨架(见图9)在顶推实施过程中起导向作用,应能够保证在顶推完毕后主梁的轴线偏位、合龙口形状均基本保持合龙口形状初步调整后的状态。因此,需要劲性骨架具有良好的竖向及横向抗弯刚度。同时,为克服昼夜温差对焊接的影响,在合龙段匹配完毕后,应锁定劲性骨架的顺桥向自由度。劲性骨架横、竖向自由度与顺桥向自由度的锁定功能应分开设置。



图9 合龙口劲性骨架

Fig.9 Stiffness skeleton frame of closure section

5 结语

斜拉桥合龙方案应综合考虑桥梁结构形式及细部构造特点、力学特性、预计合龙时间以及合龙方法对合龙时及成桥后的影响、工艺实施的风险等诸多因素,趋利避害,在理论分析的基础上制定切实可行的方案。

加载合龙方法具有较好的温度适应性;对成桥结构线形和受力影响很小,满足无应力施工控制方法的要求;通过切实可行的措施与预案可以有效控制施工中的风险,使中跨合龙始终处于受控状态,适用于大跨径混合梁斜拉桥。

参考文献

- [1] 刘明虎.大跨宽幅混合梁斜拉桥关键技术设计综述[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会2009年全国桥梁学术会议论文集.北京:人民交通出版社,2009.
- [2] 梁鹏,肖汝诚,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,2006,26(4):49-53.
- [3] 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.
- [4] 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(7):69-77.
- [5] 芳文,赵雷.大跨度斜拉桥施工力学行为参数敏感性分析[J].兰州理工大学学报,2009(6):124-130.
- [6] 陈鸣,罗承斌,吴启和,等.苏通大桥主桥中跨顶推辅助合龙技术[J].中国工程科学,2009,11(3):75-80.
- [7] 东辉,覃勇刚.南京大胜关长江大桥钢梁架设及关键技术[J].桥梁建设,2009(3):5-8.

Closure technique for the hybrid girder cable-stayed bridge of Edong Bridge

Liu Minghu¹, Tan Hao¹, Xu Guoping¹, Zhao Canhui²

(1. CCCC Highway Planning and Design Consultants Co., Ltd., Beijing 100088 China;

2. Civil Engineering Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

[**Abstract**] Based on Edong Bridge, which is the second longest hybrid girder cable-stayed bridge with 926 m long main span, the influencing factors and crucial techniques of the main span closure method for long span hybrid girder cable-stayed bridge are studied. After theoretical analysis, numerical evaluation and practical test, the loading assistant closure method is employed in Edong Bridge. The loading assistant closure method, with better thermal adaptability and less influence on bridge line and the forced status, can meet the requirements of the unstressed state control method. Based on the mentioned advantages, the loading assistant closure method is applicable to long span hybrid girder cable-stayed bridges. The conclusion can provide reference for the further design of the similar bridges.

[**Key words**] Edong Bridge; hybrid girder cable-stayed bridge; closure technique; loading assistant closure method; unstressed state control method