

大节段钢桁梁悬索桥主梁架设的窗口铰接法研究

朱红明¹, 程海潜², 李清², 宗伟², 闫勇³

(1. 湖北省路桥集团有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 湖北交通职业技术学院; 3. 西南交通大学)

摘要:针对大跨度悬索桥钢桁梁吊装过程中存在刚接时机与内力分布状态不确定等问题,基于传统的刚铰结合法提出主梁节段临时连接的窗口铰接法。该文结合白洋长江公路大桥实践,合理地设置铰接口,并确定铰接口的刚接时机,将加劲梁杆件及吊索应力控制在设计允许的合理范围内,提高了施工作业效率,节约了配重方式体系转换所需要的资源。

关键词:大跨度; 钢桁梁悬索桥; 主梁架设; 窗口铰接法

随着地锚式悬索桥跨度的不断增加,悬索桥加劲梁的刚度及自重也越来越大,在主梁架设过程中节段之间的临时连接可以采取全铰接法、全刚接法和刚铰结合法3种连接方法。3种方法中铰接法虽然架设过程中吊索和主桁各类杆件的应力比较小,但施工安全性相对较差;而刚接法在施工过程中加劲梁便开始参与结构的受力,虽然施工安全性相对较好,但有可能产生较大的应力,该应力有可能超过其极限承载应力。刚铰结合法就是将刚接法与铰接法联合使用的一种施工方法。传统的铰固转换工序存在一定的缺陷,刚铰结合需要待桥面板和桥面铺装等代荷载就位后再进行铰固转换,或直接进行铰固转换,临时铰接处的铰固转换均需单独占用关键工期,施工效率较低。

白洋长江公路大桥为双塔钢桁梁悬索桥,主跨为1 000 m,采用传统的加劲梁连接工法难以满足工程施工要求。基于此,该文基于传统的刚铰结合法提出主梁节段临时连接的窗口铰接法。该方法作为一种较好的刚铰转换技术能较好地解决上述问题。

1 窗口铰接法的基本原理与实施步骤

1.1 窗口铰接法的基本原理

窗口铰接法是对加劲梁架设、桥面系铺设阶段进行分析,采用桥梁结构非线性计算软件对主梁铰接口的设置及铰固转换方案进行动态规划设计,计算荷载需考虑跨缆吊机自重荷载与起吊荷载,对所有设置的

临时铰接口施工中的变化规律进行分析,根据每个铰接口在施工阶段出现的无应力拼装机会,综合架梁、桥面系铺设施工的全过程分析选择最佳转换时机,以实现铰接口的无应力铰固转换。实现原理如图1所示。

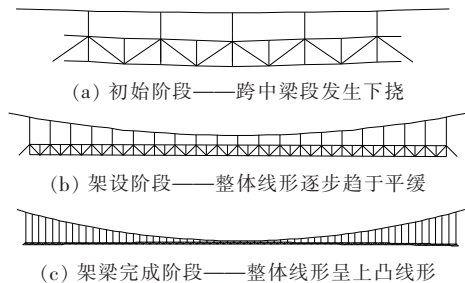


图1 窗口铰接法的原理示意图

窗口铰接法的关键在于临时铰位置的设置与刚铰转换时机的确定。

(1) 临时铰位置的设置

临时铰位置的设置有两大控制因素:起吊荷载与弦杆应力。起吊荷载即加劲梁运输到位与已安装完梁段进行连接后,起吊刚完成安装的梁段使与永久吊索进行连接所需要的起吊荷载,由跨缆吊机提供;弦杆应力即施工全过程中,弦杆应力不出现超过设计规定的应力。通常以满足两大控制因素作为设铰依据,首先综合考虑加劲梁吊装顺序等因素,然后采用有限元软件进行大量的理论计算模型分析,最后确定临时铰的数量和位置:

① 首先采用刚接法对悬索桥进行施工过程分析,按照梁段架设的顺序进行逐步查看,当加劲梁安装至某梁段时吊索力或者钢桁架力接近控制应力,则在此

梁段的前端设置临时铰。

② 在步骤①处的位置设置临时铰后,继续按照梁段架设的顺序进行逐步查看,当加劲梁安装至某梁段时吊索力或者钢桁架力接近控制应力,则在此梁段的前端设置临时铰。

③ 重复上述步骤设置临时铰,直至整个施工过程的结构内力都在容许值之内,则全桥所设置的临时铰数量及其位置便可以确定下来。

(2) 临时铰的铰刚转换时机

临时铰的铰刚转换时机需考虑温度、临时荷载等其他具体条件,此处的计算分析是基于设计温度及桥面无临时荷载等条件。为避免同一施工阶段出现多处临时铰铰固转换而影响施工进度,铰固转换方案中应考虑铰接口的转换时机不能过于集中。通过采用桥梁结构非线性软件计算对铰固转换方案进行动态规划设计,计算荷载考虑了跨缆吊机自重荷载与起吊荷载,对所有设置的临时铰接口施工中的变化规律进行分析,根据每个铰接口在施工阶段出现的无应力拼装机会,综合架梁、桥面系铺设施工的全过程分析选择最佳转换时机,以实现铰接口的无应力铰固转换。

该方法的要点为加劲梁吊装、桥面系铺设与加劲梁铰固转换同步进行,实现加劲梁、桥面系施工及临时铰固结阶段空间立体多作业面施工,在桥面系铺设完成前尽可能多地完成加劲梁临时铰体系转换。因此,该方案避免了全铰接方案中后期集中铰固转换时所占用的关键施工工期,提高了施工作业效率,同时节约了体系转换配重方式所需要的配重材料、施工设备和人力资源。由此可见,在悬索桥的加劲梁中采用窗口铰接法施工能有效地缩短工期与提高工程质量。

1.2 窗口铰接法的关键实施步骤

(1) 根据施工过程计算确定的铰接口,决定起吊梁段与已吊装梁段选择刚接或者铰接(图2)。

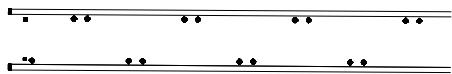


图2 钢桁梁刚接与铰接口的设置

(2) 根据其全过程计算确定的铰接梁段出现刚接时机,此时进行铰固转换。

2 工程应用

2.1 工程概况

白洋长江公路大桥为主跨1 000 m双塔单跨钢桁梁悬索桥,组合梁桥面系,主缆矢跨比为1/9,北岸边缆跨度为276 m,南岸边缆跨度为269 m(图3)。组合梁桥面系为支撑于钢桁梁横梁上弦杆顶面的多跨连续结构,支点处设板式橡胶支座。

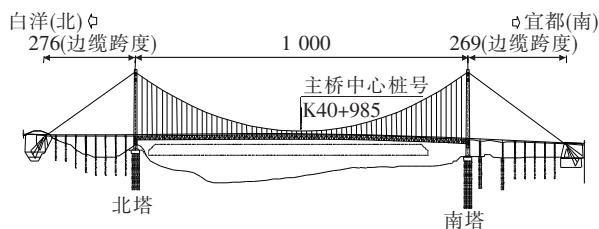


图3 桥型布置图(单位:m)

钢桁加劲梁由主桁架、横向桁架及上、下平联组成。主桁采用华伦式桁架,横向共2片主桁,中心间距为36 m,桁高为7.5 m,全桥主桁共划分为35个节段,标准节段节间长7.5 m,2个节间(15 m)设一吊索吊点,4个节间作为一节段现场整体吊装,标准节段吊装长度30 m;端部节段节间长6 m,吊装长度15.26 m;跨中节段吊装长度为10.58 m。主桁采用焊接整体节点结构形式,由主桁上弦杆、主桁下弦杆及主桁腹杆组成。主桁上、下弦杆均采用箱形截面,内高660 mm,内宽660 mm,板厚20 mm,节点处加厚至28 mm;主桁腹杆均采用工字形截面,全桥主桁竖腹杆及斜腹杆均各自采用统一规格,仅根据计算结果在端部节段局部加厚。

2.2 临时铰的设置方案

2.2.1 控制因素

通过桥梁结构非线性计算软件对白洋长江公路大桥铰接口的设置进行计算,临时铰的设置有两大控制因素:起吊荷载与弦杆应力。

吊装施工计算整体有限元模型:主缆用只受拉悬索单元模拟,吊索用只受拉杆单元模拟,桥塔、索鞍、加劲梁采用梁单元模拟。考虑施工过程中猫道改吊、缆载吊机行走等因素。

2.2.2 起吊荷载处理

根据缆载吊机的起吊能力(极限起吊荷载为500 t),加劲梁安装起吊荷载暂定为480 t。有限元计算模拟该起吊荷载,即加劲梁运输到位与已安装梁段进行连接后,使用450 t(扣除30 t吊具重量)节点荷载加载

刚完成安装的梁段使其与永久吊索进行连接,起吊荷载示意如图 4 所示。

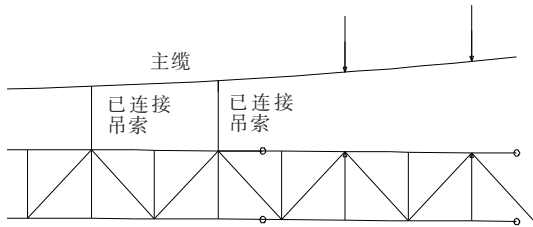


图 4 起吊荷载示意图

考虑到单幅加劲梁临时吊点有两处,现需要明确 450 t 缆载吊机起吊荷载在吊点处的分配比例,从而通过节点荷载准确模拟缆载吊机的抬升作用(图 5)。根据吊机在梁段重心位置进行起吊的情况,现通过有限元模拟缆载吊机起吊标准梁段与吊索相连,钢绞线张拉力计算结果如表 1 所示。

2.2.3 设置方案

通过有限元软件,以满足两大控制因素作为设铰依据,在综合考虑加劲梁吊装顺序等因素后,进行了大

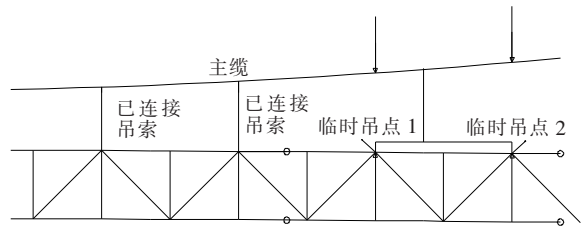


图 5 缆载吊机抬升前端梁段示意图

表 1 起吊荷载比例分配

项目	钢绞线张力/kN	比例
吊点 1 位置	1 500	2/3
吊点 2 位置	750	1/3
吊机起吊	2 250	1.0

量的理论计算模型分析,在吊索应力和缆载吊机起吊能力均满足要求的前提下保证加劲梁弦杆应力。最终采用全桥初步设置 15 组临时铰的铰接方案,15 组铰在后续加劲梁段架设及桥面系铺设过程中完成铰固转换。临时铰编号如图 6 所示。

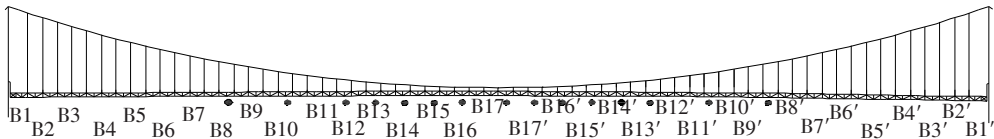


图 6 临时铰设置示意图(黑圈代表临时铰接位置)

2.3 刚接时机的确定

在临时铰位置确定之后,便需要考虑临时铰刚接的时机。铰接口刚接时机要考虑的因素有温度及临时荷载等具体条件。白洋长江大桥的计算分析是基于设计温度及桥面无临时荷载等条件。刚接时机与加劲梁吊装、桥面系铺设与加劲梁铰固转换同步进行,实现加劲梁、桥面系施工及临时铰固结阶段空间立体多作业面施工并在桥面系铺设完成前尽可能多地完成加劲梁临时铰体系转换。通过结构非线性计算软件 BNLAS 对白洋长江大桥铰接口的设置及铰固转换方案进行动态规划设计,计算荷载考虑了跨缆吊机自重荷载与起吊荷载,对所有临时铰接口施工中的变化规律进行分析,根据每个铰接口在施工阶段出现的无应力拼装机会,综合架梁、桥面系铺设施工全过程分析选择最佳转换时机,以实现铰接口的无应力铰固转换。

白洋长江公路大桥的具体铰接口转换时机的推荐顺序如表 2 所示。

2.4 加劲梁施工过程中主要构件应力

在加劲梁拼装及桥面系施工过程中,加劲梁杆件

及吊索的应力一直随施工而变化,由于采用窗口铰接法,通过合理设置铰接口和铰接口的刚接时机,将加劲梁杆件及吊索的应力控制在设计允许的合理范围内。表 3 为采用 15 组临时铰方案,加劲梁杆件及吊索的最大应力与最小应力计算值。

由表 3 可知:加劲梁的弦杆和腹杆以及吊索的内力均满足设计要求。

2.5 窗口铰接法的具体实施

(1) 全桥共设置 15 组临时铰,起重设备能力和结构内力均能满足设计要求。

(2) 加劲梁吊装阶段进行 10 组临时铰接口的铰固转换。

(3) 桥面板铺装阶段进行 5 组临时铰接口的铰固转换。

(4) 铰固转换过程中结构内力均能满足设计要求。

综上所述,加劲梁临时铰方案可行。施工单位可根据上述结果在吊梁及桥面系铺设过程中实现加劲梁吊装及临时铰固结阶段空间立体多作业面施工,在桥

表2 白洋长江公路大桥临时铰刚接时机

刚铰接转换序号	刚接时机	刚铰接转换序号	刚接时机
J01	B6、B6'吊装后	J09	B10、B10'吊装后
J02	B7、B7'吊装后	J10	B7、B8(B7'、B8')两侧桥面系铺设完成
J03	B5、B6(B5'、B6')两侧桥面系铺设完成	J11	B9、B9'吊装后
J04	B9、B9'吊装后	J12	B8、B18'吊装后
J05	B8、B8'吊装后	J13	B5、B6(B5'、B6')两侧桥面系铺设完成
J06	B10、B10'吊装后	J14	B7、B7'吊装后
J07	B17(B17')、B18 两侧桥面系铺设完成	J15	B6、B6'吊装后
J08	B7、B8(B7'、B8')两侧桥面系铺设完成		

表3 加劲梁及桥面系施工过程中的主要构件应力

项目	上弦杆/MPa		下弦杆/MPa		竖腹杆/MPa		最大吊索力/kN
	最大应力	最小应力	最大应力	最小应力	最大应力	最小应力	
加劲梁拼装	180.15	-171.86	35.62	-20.78	92.21	-107.43	110.56
桥面系施工	207.03	-189.61	184.40	-85.25	123.71	-143.62	219.13

面系铺设阶段完成加劲梁全部临时铰体系转换,实现全桥临时铰接口的闭合,提高了施工作业效率,节约了配重方式体系转换所需要的配重材料、施工设备和人力资源。

3 结语

以悬索桥加劲梁刚铰转换技术为研究对象,首先介绍了悬索桥加劲梁为什么要采用刚铰转换技术及刚铰转换技术的形式。并说明了刚铰转换技术的基本原理和相应的步骤。分析了各悬索桥加劲梁连接工法的优缺点。并引用白洋长江公路大桥的实际案例对窗口铰接法进行了详细的阐述,可得刚铰结合法结合了刚接法与铰接法的优势,而传统的刚铰结合法刚铰转换的时机是待全部梁吊装完成后再将大节段间的临时连接进行固结,最终形成完整的加劲梁。此法铰接时机过于集中影响施工的关键时期。窗口铰接法对刚接时机进行改进,利用加劲梁架设阶段和桥面系铺设阶段的加劲梁线形变化,实现临时铰接口逐步无应力固接。

参考文献:

- [1] 黄峰. 杨泗港长江大桥主桥全焊结构钢桁梁安装施工技术[J]. 世界桥梁, 2019(2).
- [2] 刘吉哈. 大跨度铁路悬索桥加劲梁施工方法研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2013.
- [3] 周杜, 刘武, 石柱. 悬索桥钢桁加劲梁架设施工关键技术研究[J]. 中外公路, 2019(3).
- [4] 贾丽君, 丛霄, 林赞笔, 等. 超大跨径三塔悬索桥加劲梁吊装方案[J]. 沈阳工业大学学报, 2017(6).
- [5] 黄小龙, 王伟, 宫立新. 松原市天河大桥北汉主桥上部结构施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2017(3).
- [6] 姜宏维, 郭建明. 大跨度悬索桥鞍座顶推研究[J]. 中外公路, 2018(6).
- [7] 刘传乐, 张国刚. 某特大跨径悬索桥跨缆吊机静载试验研究[J]. 中外公路, 2018(5).
- [8] 李陆平, 冯广胜, 罗瑞华. 武汉鹦鹉洲长江大桥主桥加劲梁架设施工技术[J]. 桥梁建设, 2016(2).
- [9] 徐欣, 刘琪, 彭元诚. 白洋长江公路大桥钢桁加劲梁设计[J]. 中外公路, 2020(1).
- [10] 闫勇. 山区大跨径悬索桥加劲梁轨索推移法架设及控制技术[D]. 西南交通大学博士学位论文, 2015.
- [11] 闫勇, 沈锐利, 张念来, 等. 一种悬索桥钢桁架加劲梁架设的窗口铰接法: 中国, CN201210472077. X[P]. 2013-05-15.