

下承式钢桁架拱肋施工技术优化分析

姚 青¹, 徐伟忠¹, 李清岭², 马海英²

[1.上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海市 200065; 2. 同济大学, 上海市 200092]

摘 要:亭枫公路桥工程为主桥下承式连续钢桁架拱桥,采用分离式两幅桥布置。主桥的上部结构主要采用钢结构,钢结构的加工、制作、运输和安装难度大,其质量控制直接关系到整座桥梁的安全。因此,合理的施工方法决定了桥梁的施工进度和施工安全性。通过有限元模型的计算结果比较不同施工方法在下承式拱桥施工过程中对拱肋的影响,比较不同施工方法在结构效应、施工成本等方面的优缺点,确定最优施工技术方案。相关的研究成果可为同类桥梁提供借鉴,对提升我国桥梁的施工水平发挥一定的作用。

关键词:钢桁架拱桥;长节段吊装施工;施工方法比较;有限元分析

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)08-0215-05

0 引 言

钢桁架拱桥造型美观、跨越能力强,具有良好的景观效应。随着我国钢材质量和产量的提高,未来修建大跨度钢桁架拱桥具有良好的前景。拱桥的常见施工方法主要有拱架施工、缆索吊装施工、塔架斜拉索施工、转体施工和整体吊装施工^[1-2]。

拱架施工一般应用于没有河道通航要求或道路通行要求较低的桥梁。这种施工方法的优点是体系的受力较明确,施工技术较成熟,不需要动用大型吊装设备,且较容易安装横撑、斜撑和控制其拱轴线,施工过程简单^[3]。这种施工方法的缺点是支架法较小的拱肋分段,也导致拱肋接头较多,所以焊接的工作量较大,工期较长,且支架施工法对桥梁下面的地形地貌、地基情况有着较高的要求,不适合大跨径桥梁的施工,只能用于小跨径、拱肋离地面不高、不通航或通航要求不高、桥下无水或水位不深、施工条件较好的情况^[3]。

缆索吊装施工是拱桥无支架施工方法之一^[4]。缆索架桥设备由于具有跨越能力大、水平和垂直运输机动灵活、适应性广、施工也比较稳妥方便等优点,尤其在修建大跨径或连续多孔的拱桥中,更能显示这种施工方法的优越性。但是,缆索吊装施工要求施工设备较多,对施工的技术要求较高,而且用的材料也要增加。

收稿日期: 2020-12-28

作者简介:姚青(1981—),男,本科,高级工程师,从事工程管理工作。

塔架斜拉索施工也是一种无支架的施工方法。这是国外采用最早、最多的大跨径钢筋混凝土拱桥无支架施工的方法^[2]。塔架斜拉索法一般多采用悬浇施工,也可用悬拼法施工,但后者用得较少。

拱桥转体施工是一种适合单跨拱桥的施工方法^[5-6]。拱桥的转体施工法,根据其转动方位的不同,可分为竖向转体、平面转体和平竖结合转体 3 种。转体施工法避免了有支架法无法用于山谷和深水地形的情况,减少了高空作业,施工速度快,费用低。同时提高了桥梁的安全性,确保了桥梁的施工质量。但是转体施工法也有明显的缺点,即施工跨径不能过大;否则会造成施工难度增大、经济效益下降^[7]。

整体吊装施工适用于下承式与中承式钢管混凝土拱结构方案^[8]。整体吊装法的优点有:不在水中设临时支架、不影响通航,无水中支架费用;充分发挥钢管拱的作用,完成上部结构施工;适用下承式与中承式拱式组合桥。整体吊装法也有缺点:节段过长需要大型起吊设备,吊装过程中的安全和稳定问题突出。

关于运用有限元软件进行拱桥施工方法的研究,郭玉龙^[9]利用 Midas 软件建立了纳界河钢桁架拱桥的有限元模型,研究了悬臂拼装过程中索力的控制;彭小明^[10]利用 Midas 软件建立了重庆朝天门大桥悬臂施工的有限元模型,进行了桥梁运营状态下的静力分析;王德洪^[11]利用桥梁博士软件模拟了某大跨度钢桁架拱桥梁吊机的施工过程,进行了相关施工控制分析;刘旭^[12]利用 ANSYS 软件建立了横琴二桥悬臂施工的有限元模型,研究了施工过程中索力和压重控制。

本文采用 Midas 软件进行建模分析,对不同施工方法的拱肋结构性能进行研究,比较长节段吊装施工的优势,可为拱肋快速化施工提供参考。

1 工程概况

本项目背景工程平申线航道(上海段)整治亭枫公路桥工程主桥为分离式两幅桥布置,先施工北幅新桥、老桥维持交通,北幅新桥建成后拆除老桥再建设南幅新桥。主桥为 30 m+120 m+30 m 下承式连续钢桁架拱桥,分离式两幅桥布置并在两幅桥中间设置人行道,桥宽 $2 \times 18.25 \text{ m} + 3.15 \text{ m}$ 。每幅桥有两榀桁架,桁架间采用 5 道风撑连接。桥面梁采用钢梁与混凝土桥面板组合梁,两者通过剪力钉结合。其中,纵向系梁、横梁和小纵梁共同组成钢梁格体系。拱肋和主梁施工方案的选择直接影响成桥后桥梁的安全使用及寿命。桥梁整体模型渲染图如图 1 所示。

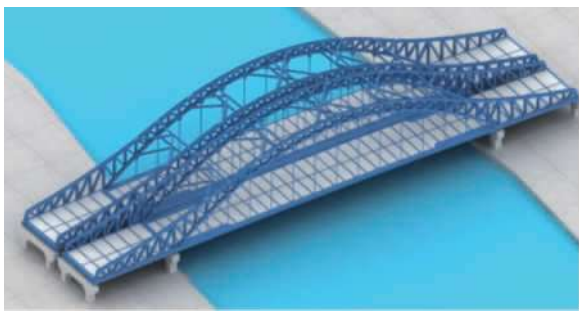


图 1 亭枫公路桥模型渲染图

本文以亭枫公路桥为背景,通过综合对比不同施工方法对成桥状态的影响,以及施工成本、周期等内容,选择适合本跨径的施工方法,并对相似跨径的钢桁架拱桥提供借鉴。

2 有限元建模

结合项目背景,为了防止对河道的通航产生影响,现初步拟定 3 种拱肋施工方案,分别为整体吊装施工、平面转体施工和长节段吊装施工。在 Midas 软件中建立 3 种拱肋施工方案的有限元模型。

2.1 整体吊装施工

整体吊装的施工方法是首先在河岸两端满堂支架对边跨进行施工,之后将预制好的拱肋运至相应部位后进行整体吊装;拱肋施工完成后张拉临时系杆,之后进行桥面系钢结构的施工;最后安装桥面板。在进行有限元建模的过程中,拱肋施工的主要步骤有:(1)边跨施工;(2)拱肋整体吊装到位;(3)拱肋合龙;(4)张拉临时系杆;(5)拆除临时支撑。整体吊装施工拱肋的施工示意图如图 2 所示。

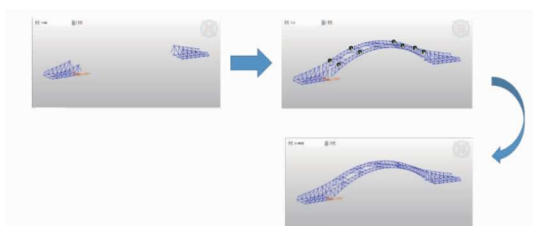


图 2 整体吊装拱肋施工示意图

2.2 平面转体施工

平面转体的施工方法是首先将边跨平行于河岸满堂支架施工;其次,将拱肋在岸边施工完成后,先在竖平面内转动至指定高度与边跨连接,再将拱肋和边跨一起转动至指定位置,左右两个悬臂段全部旋转到位后进行合龙施工;合龙后张拉临时系杆,之后进行桥面系钢结构的施工;最后安装桥面板。在进行有限元建模的过程中,拱肋施工的主要步骤有:(1)边跨施工;(2)两侧拱肋对称施工;(3)绕拱脚旋转到位;(4)拱肋合龙;(5)张拉临时系杆;(6)拆除临时支撑。平面转体拱肋施工示意图如图 3 所示。

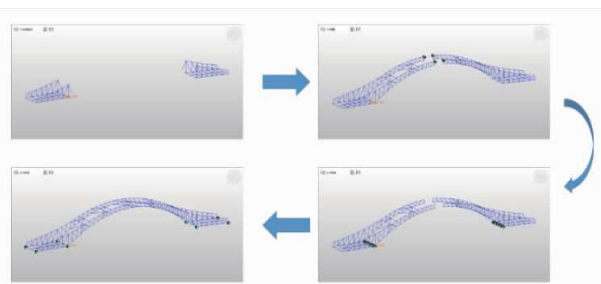


图 3 平面转体拱肋施工示意图

2.3 长节段吊装施工

与整体吊装不同,长节段吊装的施工方法可以先满堂支架施工边跨部分,之后在通航孔的两侧设置临时支架,直接搭设部分拱肋;将通航孔上方的拱肋在工厂预制好后,将两侧拱肋分别吊装至指定位置后,将它们与之前搭设好的拱肋相连,并加装拱顶的风撑;合龙后张拉临时系杆;之后进行桥面系钢结构的施工;最后安装桥面板。在进行有限元建模的过程中,拱肋施工的主要步骤有:(1)边跨施工;(2)悬臂段施工;(3)节段吊装到位;(4)拱肋合龙;(5)张拉临时系杆;(6)拆除临时支撑。长节段吊装拱肋示意图如图 4 所示。

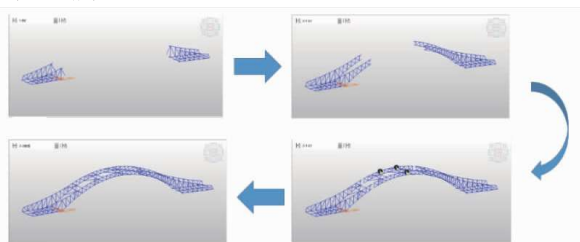


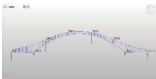
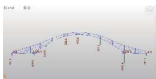
图 4 长节段吊装拱肋施工示意图

3 计算结果分析

3.1 反力

表1是3种施工方法下反力大小和相关设备使用情况的对比。

表1 反力对比

施工方案	整体吊装施工	平面转体施工	长节段吊装施工
反力图			
最大反力	835.0 kN(吊索)	1 905.5 kN(吊索)	529.2 kN(吊索)
吊点数量	单侧4个、共8个	4个	单侧2个、共4个
需要设备	4台200 t浮吊	卷扬机、滑轮组	2台180 t浮吊
施工组织	4台设备同步	2台设备同步	2台设备同步
施工成本	4台浮吊租赁	塔架+卷扬机	2台浮吊设备

通过3种施工方法的对比可以看出,平面转体施工的支点反力较大,且采用的设备不同于吊装施工。两种吊装施工方法中,整体吊装施工由于反力较大,需要采用设备数量更多、起重重量更大的浮吊。

在施工组织方面,平面转体施工在竖平面转动和平面转动的过程中需要2台卷扬机同时工作,保证拱肋不会扭转;在合龙过程中需要4台卷扬机同时工作,保证两侧拱肋高度相同。整体吊装过程中,拱肋上一共有8个吊点,需要4台浮吊同时进行吊装。长节段吊装过程中,只需要2台浮吊同时吊装就可以完成施工过程的要求。

在施工成本方面,平面转体因为塔架需要现场施工且不能循环利用,因此前期投入会很大。吊装施工的设备都可以通过租赁获得,与长节段吊装相比,整体吊装每台浮吊的起重质量大于长节段吊装浮吊的起重重量,并且整体吊装需要的浮吊数量是长节段吊装的2倍。因此,整体吊装施工时,拱肋的施工成本是长节段吊装施工的2倍以上。

在施工周期方面,平面转体施工由于拱肋自重较大,旋转速度较慢,一般需要用时10 d左右。整体吊装施工由于吊装部分自重较大,吊装速度较慢,吊装过程大致需要2~3 d。长节段吊装施工充分利用河道通航孔的信息,最大程度减轻了吊装重量,吊装过程可以缩短至1~2 d。

3.2 位移

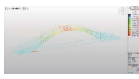
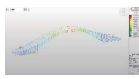
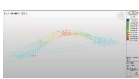
结构的位移分为绝对位移和相对位移。结构的绝对位移是指结构各部分相对于原始结构的位移,

主要影响成桥后拱肋的形状。结构的相对位移是指将要连接起来的两部分结构之间的相对位移,主要对结构的合龙状态产生影响。

3.2. 绝对位移

表2是结构绝对位移数值和最大绝对位移产生的阶段和位置的对比。

表2 绝对位移对比

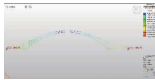
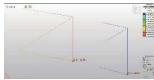
施工方案	整体吊装	平面转体	长节段吊装
位移图			
最大竖向位移	34.3 mm	66.2 mm	40 mm
产生阶段	临时支撑拆除	钢拱肋安装	临时支撑拆除
产生位置	拱肋跨中处	临时扣点处	拱肋跨中处

通过3种施工方案下结构绝对位移的对比可以看出,3种施工方案拱肋施工过程中的最大竖向位移均发生在跨中附近,平面转体施工的竖向位移比另外两种施工方法稍大一些,长节段吊装施工与整体吊装施工竖向位移相差不大。

3.2.2 相对位移

表3是结构相对位移数值和最大绝对位移产生位置的对比。

表3 相对位移对比

施工方案	整体吊装	平面转体	长节段吊装
位移图			
相对位移	2.04 mm	44.20 mm	6.57 mm
位置	合龙处	边跨悬臂端	合龙处

通过3种施工方案下相对位移的对比可以看出,平面转体施工由于施工过程中体系转换的不同,会造成较大的相对位移;长节段吊装施工的相对位移比整体吊装施工的相对位移大。

3.3 内力

表4是结构内力的最大值及最大值出现的阶段及位置的对比。

由上面数据对比可得,上弦杆最大负弯矩整体吊装与长节段吊装相差不大,均大于平面转体施工;最大正弯矩整体吊装与长节段吊装相差不大,均小于平面转体施工。下弦杆最大负弯矩整体吊装施工最小,平面转体和长节段吊装相差不大;最大正弯矩平面转体施工最大,整体吊装与长节段吊装相差不大。

表 4 结构内力对比

施工方法		整体吊装		平面转体		长节段吊装	
结构		上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦
最大负弯矩	数值/(kN·m)	-207.57	-115.17	-144.08	-229.11	-200.57	-218.04
	位置	跨中附近吊点	拱脚	边跨端点	拱脚	吊点	拱脚
	阶段	整体吊装	拆除临时支撑	合龙	拱肋安装	节段吊装	节段吊装
最大正弯矩	数值/(kN·m)	112.72	70.34	179.67	114.55	97.41	65.26
	位置	跨中	跨中	边跨	半片拱肋中部	跨中	跨中
	阶段	拆除临时支撑	拆除临时支撑	合龙	拱肋安装	拆除临时支撑	拆除临时支撑

3.4 应力

3.4.1 施工阶段应力

对于整体吊装来说,拱肋的施工过程包括边跨施工、整体吊装 2 个阶段。在这个 2 个阶段中,应力最大值出现在吊装的过程中,位置位于风撑上,最大拉应力为 26.8 MPa,最大压应力为 26.4 MPa。

对于平面转体来说,拱肋的施工过程包括边跨的施工、拱肋的张拉和整体的转动 3 个阶段。在这 3 个过程中,应力最大值出现在转动的过程中,最大拉应力为 68.8 MPa,最大压应力为 52.1 MPa。

对于长节段吊装来说,拱肋的施工过程包括边跨施工、悬臂段的安装和长节段的吊装 3 个阶段。在这 3 个阶段中,应力最大值出现在悬臂段的安装过程中,最大拉应力为 41.7 MPa,最大压应力为 28.3 MPa。表 5 为 3 种施工方案在拱肋的施工阶段出现的最大应力的对比。

表 5 施工阶段应力对比

施工方案	整体吊装	平面转体	长节段吊装
最大拉应力	数值/MPa	26.8	41.7
	阶段	吊装	悬臂段安装
最大压应力	数值/MPa	26.4	28.3
	阶段	吊装	悬臂段安装

通过对 3 种施工方案的施工过程结构应力的对比可以看出,平面转体施工在施工过程中应力最大,整体吊装施工在施工过程中应力最小。

3.4.2 合龙阶段应力

对于整体吊装来说,可以将合龙、张拉临时系杆和拆除临时支撑作为拱肋合龙的过程。在这 3 个过程中,最大拉应力出现在拆除临时支撑的过程中,最大拉应力为 28.6 MPa,最大压应力出现在合龙的过程中,最大拉应力 27.3 MPa。

对于平面转体来说,可以将合龙、张拉临时系杆和拆除临时支撑作为拱肋合龙的过程。在这 3 个过程中,最大拉应力出现在合龙的过程中,最大拉应力为 42.6 MPa;最大压应力出现在合龙的过程中,最大

拉应力 38.8 MPa。

对于长节段吊装来说,可以将合龙、张拉临时系杆和拆除临时支撑作为拱肋合龙的过程。在这 3 个过程中,最大拉应力出现在合龙的过程中,最大拉应力为 40.1 MPa;最大压应力出现在合龙的过程中,最大拉应力 39.4 MPa。

表 6 为 3 种施工方案在拱肋的合龙阶段出现的最大应力的对比。

表 6 合龙阶段应力对比

施工方案	整体吊装	平面转体	长节段吊装
最大拉应力	数值/MPa	28.6	40.1
	阶段	拆除临时支撑	合龙
最大压应力	数值/MPa	28.5	39.4
	阶段	合龙	合龙

通过对 3 种施工方案合龙过程中的应力进行对比,整体吊装施工合龙过程中应力最小,平面转体施工和长节段吊装施工合龙过程应力差别不大。

3.4.3 成桥状态应力

根据有限元模型计算结果可以得到,整体吊装施工成桥后最大拉应力为 119.7 MPa,最大压应力为 119.2 MPa;平面转体施工成桥后最大拉应力为 120.2 MPa,最大压应力为 121.7 MPa;长节段吊装施工成桥后最大拉应力为 119.8 MPa,最大压应力为 120.6 MPa。

表 7 为 3 种施工方案在拱桥的成桥状态下出现的最大应力的对比。

表 7 成桥状态应力对比

施工方案	整体吊装	平面转体	长节段吊装
最大拉应力/MPa	119.7	120.2	119.8
最大压应力/MPa	119.2	121.7	120.6

通过对 3 种施工方案成桥后应力状态的对比,3 种施工方案成桥应力大小差别很小。

4 结 论

根据结果对比,可以得出以下结论:

(1)在成桥应力方面,3种施工方案的成桥应力相差不超过5%,可以认为施工方案的选择不会对成桥应力产生影响。

(2)转体施工时拱肋的位移较大,其他2种吊装施工方法施工过程中拱肋位移相差不大,优先选用吊装施工方法。

(3)3种施工方法施工过程中内力变化不同,但极值相差不大。

(4)3种施工方法在施工反力上的差别导致了在施工设备、施工组织、施工成本和施工周期等方面产生的差别。其中,长节段吊装施工具有较为明显的优势,是本桥快速化施工的优势方案。

参考文献:

[1] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2001.

[2] 姚玲森.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2008.

[3] 王月辉.钢管混凝土拱桥施工方法探讨[J].北方交通,2020(8):35-38,41.

[4] 王建森.浅谈大跨度拱桥施工方法[J].四川水泥,2017(7):26.

[5] 侯宝林.拱桥转体法施工工艺探讨[J].江西建材,2015(13):152-153.

[6] 邵明春.钢管混凝土拱桥转体施工技术[J].桥梁建设,2003(S1):31-33,37.

[7] 王思宇.拱桥施工方法之浅谈[J].四川水泥,2019(11):276.

[8] 龚磊磊,宋瑞斌.下承式系杆钢拱桥整体吊装关键技术[J].中国水运(下半月),2016,16(2):199-202.

[9] 郭玉龙.大跨度钢桁架拱桥施工控制技术研究[D].成都:西南交通大学,2015.

[10] 彭小明.大跨度钢桁架拱桥仿真计算分析[D].北京:北京交通大学,2008.

[11] 王德洪.大跨度钢桁架拱桥施工技术研究[D].成都:西南交通大学,2012.

[12] 刘旭.大跨度钢桁架拱桥施工三维仿真分析[D].郑州:华北水利水电大学,2018.

(上接第190页)

结果,将各排水点改接至对应的雨、污水管网。

3.2.2 下垫面海绵化

(1)停车场下垫面透水性改善

厂区现状综合径流系数高达0.83,而位于中部的停车场面积达到整体硬质铺装的17.3%,第二阶段计划结合中部停车场地下空间的改造,将其地面铺装改为植草砖以改善该区域下垫面的透水性,经估算改建后综合径流系数可降低至与所属武宁排水系统较为接近的0.74。

(2)路面翻新与人行区域透水性铺装改建

结合管网改造翻排雨水口,并翻新厂区路面为黑色路面,其中约40%的人行区域采用透水沥青,进一步降低厂区综合径流系数至0.68。

4 结 语

建成年代较长的工业厂区,由于其历史原因和自身特点,是水污染防治过程中较难治理的一类污染源。该设计兼顾政策执行与企业需求,探讨了在做好现状及问题摸排的前提下,分阶段地采取污“废”分流、截污堵排、源头治理、接口扩增、雨污分流、下垫面海绵化等措施,进行截污控源与排水系统改建的设计思路。

参考文献:

[1] 刘芳.小区雨污混接改造设计探讨[J].城市道桥与防洪,2020(10):102-104.

[2] 张军臣.印钞废水深度处理中试研究[D].广东广州:广州大学,2016.