

# 高海拔寒冷地区矮塔斜拉桥施工关键技术

严伟飞, 杨涛, 郭智刚

(浙江省大成建设集团有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 高寒高海拔地区矮塔斜拉桥建造受地理环境以及气候影响,相较于海拔较低气候适宜地区桥梁,其材料性能、结构线形、耐久及运营安全均受到不同程度的影响。为解决上述问题,该文以柳东大桥为例,采用少支架拱架体系解决了拱塔的横向稳定性问题;通过塔梁同步施工技术,实现了主塔、主梁同步施工的立体化作业方式,有效地缩短施工工期,提高了经济效益;通过设置临时支架和转向滑轮方式,解决了矮塔斜拉索穿索困难的问题。

**关键词:** 矮塔斜拉桥; 正圆形桥塔; 支架现浇; 悬臂浇筑; 同步施工

矮塔斜拉桥以其独特的优势,近些年来,在多地被广泛采用,但是绝大多数桥梁所处位置海拔较低,昼夜温差不大,气候适宜,质量易于控制。随着中国综合国力显著增强,西部大开发战略的实施和桥梁技术的发展,很多矮塔斜拉桥相继在高海拔、寒冷地区出现,在特殊地理环境下修建桥梁,材料性能受地理环境影响显著,对结构的耐久性及运营安全性构成了极大威胁,严重影响桥梁在西部的进程,现已成为社会各界关注和研究的焦点。

矮塔斜拉桥处于高寒高海拔地区,在昼夜温差大、日照时间长、太阳辐射强烈、干旱少雨和寒潮等恶劣的气象因素作用下,结构会产生非线性的温度分布,这种非线性温差会在结构中产生较大的温度应力和变形,混凝土受到日照辐射、温差大、低温干燥作用,其收缩徐变发展迅速,在影响混凝土结构本身性能的同时,对结构线形、索力产生不利影响,且由于收缩徐变计算理论较多、收缩徐变计算不准等因素,往往会超过荷载所产生的效应,从而造成结构破坏。因此对高寒高海拔地区塔梁同步施工及施工控制带来了极大的难度,如何能把此极端环境对桥梁结构的危害降到最低,解决收缩徐变对结构线形、索力产生不利影响,制定有效可行的混凝土施工工艺和方案已迫在眉睫。

现阶段,塔梁同步施工在高寒高海拔地区应用研究处于探索阶段,在设计和施工方面可提供的经验和资料十分欠缺,故该文将对高海拔、高寒地区矮塔斜拉桥塔梁同步施工进行研究,明确同步施工中混凝土收缩徐变的变化规律,对各梁段线形、内力和索力的影

响,研究结论可为后续在高寒高海拔地区矮塔斜拉桥同步施工提供有益借鉴。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

柳东大桥位于拉萨市的西南,拉萨河下游,主桥为中国高寒高海拔地区首座预应力钢筋混凝土正圆形拱塔斜拉桥,主桥跨径采用(70+120+70)m,塔梁固结,塔墩分离的双索面矮塔斜拉桥,桥型布置立面如图1所示。主桥桥塔采用预应力钢筋混凝土结构的正圆形塔,桥塔高26.60m,圆直径为36.4m,壁厚2.5m,纵桥向宽度7.0m。桥塔外壁设置了太阳能光伏板。主梁为变截面预应力混凝土单箱四室直腹板箱梁结构,桥面宽31m,箱底宽24.5m,顶板悬臂宽3.25m,纵桥向共分为21个节段。墩顶处箱梁断面高度5m,跨中处箱梁断面高为3m,梁高按二次抛物线变化,箱梁混凝土采用C50。主墩采用U形实体墩,过渡墩采用双柱接盖梁形式,单柱桥墩采用花瓶形墩,分离式矩形承台,基础为群桩基础。

### 1.2 主桥施工难点

(1) 主桥桥塔为正圆形拱塔,设计造型美观,但空间效应明显,结构空间受力复杂,施工难度大。

(2) 正圆形拱塔为空间曲面结构,由于操作空间狭小,竖向预应力钢束穿束困难及压浆密实度难以保证。

(3) 由于矮塔斜拉桥施工工期紧,挂篮悬浇是工

程工期的控制性工序,若按照矮塔斜拉桥施工工序先施工桥塔,再悬臂挂篮施工梁体,则无法满足工期要求。而目前已实现塔梁同步施工的斜拉桥均是独柱式与 H 形塔等直立式桥塔较多,而正圆形拱塔矮塔斜拉桥塔梁同步的施工工艺存在空白。

(4) 项目位于高寒高海拔地区,且工期紧,混凝土

质量难保证。拉萨地区气温为多年平均 7.8℃,最高 27℃,最低-15.7℃,海拔 3 620~3 680 m,其特征表现为温度低、风蚀影响大,施工期对混凝土养护、抗冻融性能、抗裂性能要求高。

(5) 矮塔斜拉桥主塔处设置转索鞍,如何将斜拉索穿过索鞍分丝管,是矮塔斜拉桥的共性难点。

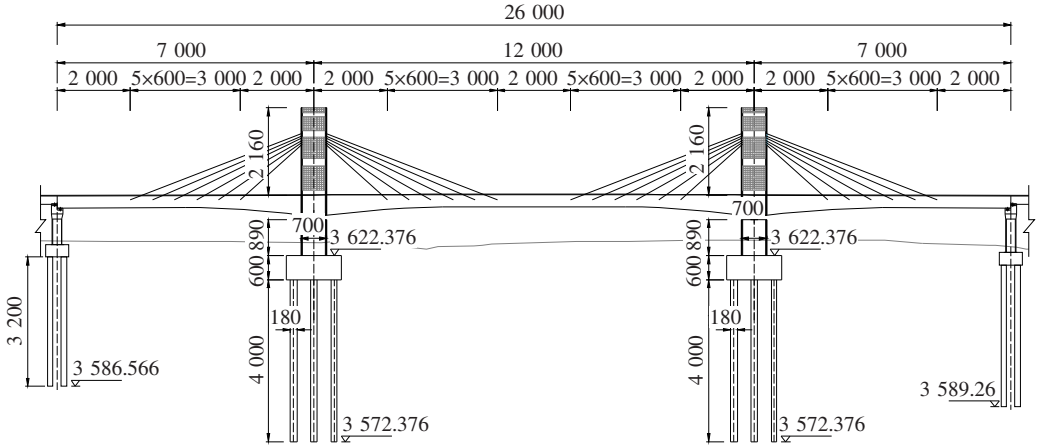


图 1 柳东大桥桥型立面布置图(除标高为 m 外,其余单位:cm)

2 主桥施工关键技术研究

2.1 桥塔施工技术研究

正圆形桥塔采用翻模施工,但由于塔柱为正圆形,不仅施工过程中模板固定困难,而且在混凝土浇筑时因其自重的水平分力及混凝土侧向冲击力使拱塔向外倾斜,使塔柱横向变形难以控制,同时也使得桥塔支架体系的横向稳定性设计成为关键。

为了克服桥塔和支架体系横向水平受力问题,通过钢管柱+排架的少支架拱架体系,并根据桥塔结合结构有限元分析结果将塔柱分 3 次进行左右对称浇筑,其中第 3 段剩余拱顶为 14.4 m 长,作为合龙段。

少支架拱架体系采用钢管立柱、柱间连接系、桩顶分配梁(2H488×300)、砂筒、排架及模板系统,钢管立柱横桥向采用 5 道  $\phi 630 \times 12$  mm 钢管,横桥向间隔为 6.025 m,纵桥向间隔为 4.5 m,钢管连接系采用  $\phi 278 \times 6$  mm 钢管。排架采用 HN200×100 和 HW200×100 型钢,排架 A 共 4 排,排架 B 共 10 排,排架 C 共 10 排,排架 A 与钢管柱用分配梁抄紧,排架 B 低端支撑在钢管柱上横向分配梁上,另外一端支撑在排架 C 上,由于排架 B 上存在较大水平力,为此,对排架 C 局部构件进行加固,排架 B 与排架 C 之间用钢板进行抄紧,将水平力直接传到排架 C 上。排架与拱架间采用

砂筒连接,便于后续的桥塔体系转化及脱模作用,主桥少支架拱架体系布置如图 2 所示。

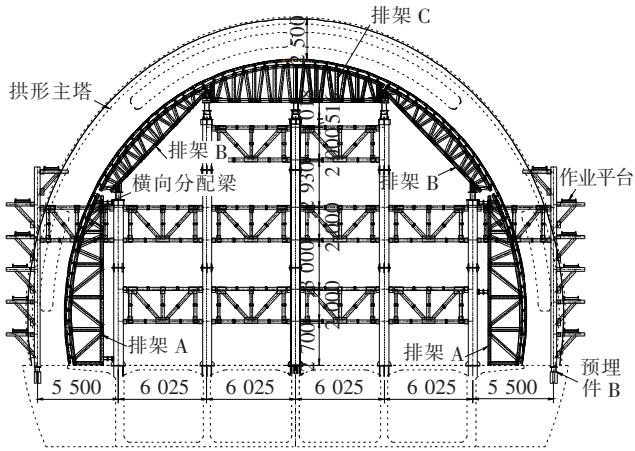


图 2 主桥少支架拱架体系布置(单位:mm)

2.2 正圆形桥塔预应力施工体系及压浆工艺研究

柳东大桥桥塔为正圆形拱塔,属于空间曲面结构,进行预应力张拉的施工难度在于受操作空间和结构限制不能从一端向另一端穿束,因此考虑通过桥塔拱顶开孔,分别向桥塔两端穿束的方式,有效地解决了钢绞线穿索困难问题。不足之处是施工中存在波纹管破损,在实际施工过程中将拱顶破开处的波纹管开口位置设置朝上,通过用小于 1/3 弧的高密度聚乙烯波纹管胶黏结或者热熔方式封闭;预应力张拉结束后全覆

盖检查波纹管的完好性,并于上塔柱最顶端设置出浆口。张拉前采用机械轻微牵引预应力束的一端来检查是否漏浆,如存在漏浆可采用张拉伸长量来判断漏浆点后进行处理。

桥塔预应力管道采用智能张拉压浆工艺,为了保证孔道内浆液饱满,防止管道内形成空洞,常规压浆无足够压力保证从下往上压浆到位。该文采用类似于钢管拱桥压浆工艺技术,将压浆机置于桥塔顶部,用钢管接至桥塔底部压浆孔,桥塔顶部设置排气孔,采用连通器的方式以浆液自身水压加压浆机压力将孔道压浆饱满。

### 2.3 塔梁同步施工关键技术研究

主桥箱梁纵桥向 $0^{\#} \sim 3^{\#}$ 块及边跨现浇段采用支架体系现浇, $4^{\#} \sim 18^{\#}$ 节段采用三角挂篮悬臂浇筑,合

龙段采用吊架施工。由于箱梁宽度较大,对挂篮的设计要求较高,尤其是挂篮的横向刚度成为设计关键。此外柳东大桥位于高寒高海拔地区,通过塔梁同步立体交叉施工有效解决了施工工期问题。

#### 2.3.1 宽幅挂篮设计

挂篮采用三角斜拉式后支点挂篮,挂篮由工字钢组焊而成主桁片,主梁采用 $2[36a$ 型钢,竖杆采用 $2[32a$ 型钢,前、后拉杆采用 $2[32a$ 型钢。由于桥梁宽度为 $31\text{ m}$ ,为了确保挂篮的横向稳定性,该文采用横向结构体系上横梁采用 $2\text{HN}400 \times 200$ ,前下横梁采用 $2\text{HN}400 \times 200$ ,后下横梁采用焊接桁架结构 $2\text{HN}400 \times 200$ ,下纵梁采用 $\text{HN}400 \times 200$ ,吊杆材料采用 $\phi 32\text{ mm}$ 精轧螺纹钢。升降系统采用螺旋式千斤顶或液压千斤顶作动力,三角斜拉式挂篮设计图如图3所示。

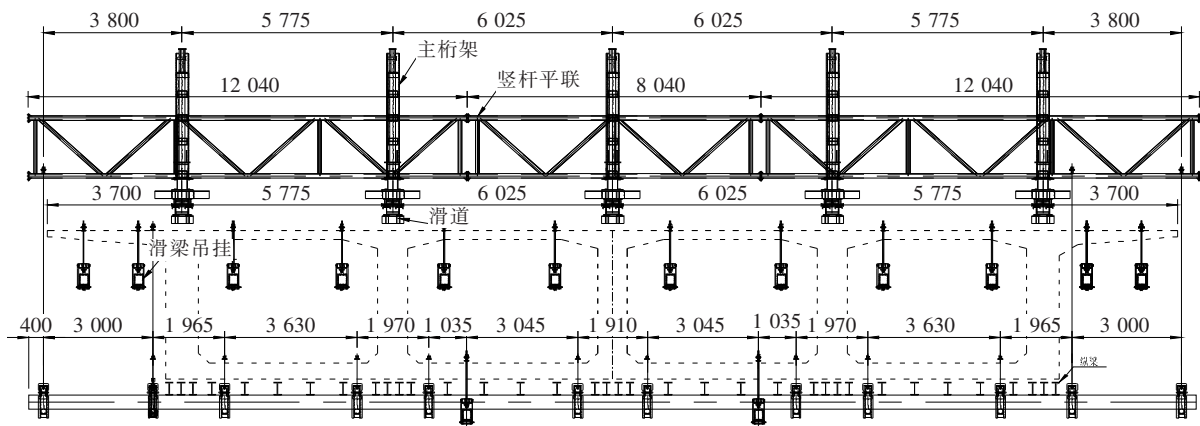


图3 三角斜拉式挂篮设计图(单位:mm)

#### 2.3.2 塔梁同步施工技术研究

塔梁同步施工方法即在桥塔施工完成前就开始分段对主梁进行挂篮悬臂施工,并同步进行索塔施工,待主梁悬臂施工达到临界状态以及主塔施工完毕后,安装和张拉斜拉索,再继续悬浇至全桥合龙的过程。

该文采用正圆形拱塔分段浇筑施工的同时,挂篮悬臂浇筑 $1^{\#} \sim 6^{\#}$ 节段,待整个桥塔浇筑完毕,达到设计强度后,安装并张拉第1道斜拉索,挂篮继续悬臂浇筑 $7^{\#} \sim 9^{\#}$ 节段,安装并张拉第2道斜拉索,依次循环至施工完成节段梁,边跨梁段合龙,再中跨合龙。通过塔梁同步施工,实现了主塔、主梁同步施工的立体化作业方式,合理组织安排了人机料等交叉作业,有效地缩短了施工工期,提高了经济效益。

影响塔梁同步施工的主要因素有:结构刚度误差、浇筑混凝土误差、桥面临时荷载影响、斜拉索张拉力误差、预应力束张拉力误差、挂篮及模板定位误差、挂篮

变形误差等。针对这些影响因素,采取的施工控制对策如下:

- (1) 梁段混凝土的浇筑、钢束的张拉、挂篮和机具的移动等均应遵循对称、均衡、同步进行的原则。
- (2) 对原材料严格把关,优化配合比,确保各梁段的结构尺寸和自重满足设计要求。
- (3) 对称张拉斜拉索,监测结构的受力情况。
- (4) 控制悬臂施工过程中的不平衡荷载。
- (5) 加强对拱塔以及主梁偏位的监测。
- (6) 对挂篮刚度进行验算。
- (7) 建立误差纠偏机制,对每个节段进行误差分析和误差纠偏。

塔梁同步施工过程中,交叉作业多,安全风险大,尽量避免塔梁荷载同时发生变化,禁止塔梁同时进行混凝土的浇注。



## 2.4 高寒高海拔地区混凝土质量控制技术研究

通过对混凝土进行热工计算分析研究,对混凝土温度全过程进行监控。从混凝土拌和温度、搅拌机中倾出时的温度、经运输成型后温度、因钢筋及模板吸热后的温度、蓄热法养护过程温度等进行热工计算分析,并对混凝土原材料进行如下温控措施:混凝土采用加 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 防冻剂,锅炉烧热水拌和混凝土,保证混凝土出机温度不低于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,现场实际混凝土入模温度 $10\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。混凝土拌和站水泥罐及罐车采用棉被包裹,混凝土浇筑过程中搭设保温棚,内设蒸汽管道,通过棚布与保温棉覆盖养生,同时蒸养过程中分3个阶段进行温度控制:升温阶段 $\rightarrow$ 恒温阶段 $\rightarrow$ 降温阶段,确保高寒高海拔地区混凝土质量满足规范要求。

## 2.5 斜拉索安装工艺研究

柳东大桥采用填充型环氧涂层钢绞线斜拉索,每侧主塔设6对斜拉索,斜拉索采用平行钢绞线斜拉索体系。桥塔处以散索鞍中心点处设置定位骨架,精确定位导管预埋两端锚点的切向方向和导管安装角度,再将散索鞍与桥塔浇筑成一体。斜拉索穿索采用临时支架和转向滑轮等组成的机械方式穿索,如图4所示。

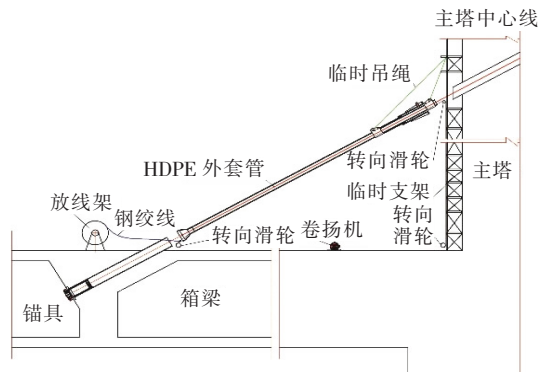


图4 转索鞍定位及机械穿索布置图

首先在桥塔附近设置临时型钢支架体系,将卷扬机绕过转向滑轮,与穿索板两端用卸扣连接,穿入HDPE管内,使其成为闭合回路,通过塔内卷扬机,使用牵引绳带动钢绞线上行,直至钢绞线穿过塔内锚具,接着卸除钢绞线与塔内卷扬机连接器的连接,安装夹片并打紧,然后在挂篮上将钢丝引棒向上传直至其露出预埋管出口,再将钢丝引棒与接头连接,将钢绞线穿入梁下锚具直至钢绞线穿过梁内锚具,安装夹片并打紧,最后在张拉端安装单孔反力架,用单孔千斤顶

对钢绞线按设计或监控给定的张拉力进行张拉并顶压锚固。

## 3 结语

根据柳东大桥施工过程中的实际情况,针对正圆形拱塔施工难度大、桥塔处竖向预应力钢束穿束困难及压浆密实度难以保证、施工工期紧、斜拉索穿索难度大等技术难点,分别采用正圆形桥塔及少支架拱架体系结合排架体系,塔梁同步技术立体化作业方式,高寒高海拔地区混凝土质量控制、斜拉索穿索临时支架与滑轮体系等技术措施,解决了上述难点,取得了较好的经济和社会效应,可为类似的矮塔斜拉桥施工提供参考。

## 参考文献:

- [1] 施文杰.矮塔斜拉桥在国内外的发展与实践[J].现代交通技术,2012(3).
- [2] 陈从春,周海智,肖汝诚.矮塔斜拉桥研究的新进展[J].世界桥梁,2006(1).
- [3] 庄年,应伟强.北京某矮塔斜拉桥的设计与施工实践[J].特种结构,2011(1).
- [4] 李春生,潘江波.矮塔斜拉桥施工关键技术研究[J].人民交通,2018(3).
- [5] 覃巍巍,石伟,雷欢.京杭运河矮塔斜拉桥主塔及斜拉索施工方案[J].预应力技术,2017(6).
- [6] 焉学永,张念来,欧阳钢,等.安庆长江大桥索塔中塔柱施工技术[J].中外公路,2004(6).
- [7] 李春元.大型跨海矮塔斜拉桥施工关键技术[J].公路交通科技(应用技术版),2016(6).
- [8] 龙佩恒,路泽超,侯苏伟,等.钢-混叠合梁独塔斜拉桥塔梁墩固结区应力分析研究[J].中外公路,2018(1).
- [9] 李炎,陈常松,董道福.斜拉桥施工控制张拉力的计算方法研究[J].中外公路,2019(2).
- [10] 张国栋,李源,宋一凡,等.前支点挂篮斜拉桥施工过程中中间索力的确定方法[J].中外公路,2017(4).
- [11] 涂光亚,戴政,颜东煌,等.无后锚前支点挂篮施工过程受力分析研究[J].中外公路,2013(2).
- [12] 刘国坤,颜东煌,涂光亚,等.斜拉桥前支点挂篮主梁混凝土浇筑上下游不同步对施工控制的影响[J].中外公路,2016(1).
- [13] 吴明威,陈林,刘冬冬,等.PC斜拉桥大型前支点挂篮安装技术[J].中外公路,2017(1).