

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.03.025

斜拉桥超高索塔上横梁装配桁架式支撑 体系设计施工关键技术

王鹏

(中铁十一局集团第六工程有限公司, 湖北 襄阳 441104)

摘要:钢筋混凝土 H 形索塔是常见的一种索塔结构类型,其结构组成为塔肢和横梁两部分。索塔上横梁一般为非承重横梁,不同于其他常规预应力钢筋混凝土结构,其在托架结构设计、施工动态控制等方面存在其自身特点。该文结合广东西江特大桥跨西江 600 m 混合梁斜拉桥上横梁托架设计和施工实况,深入研究分析了装配桁架式支撑体系的安全性和便捷性。从结构受力、整体安拆和周转利用等多角度阐述了该类型托架施工技术的可行性,实现了索塔结构安全快速化施工。

关键词:斜拉桥;索塔上横梁;装配式;桁架式;托架设计与施工

随着中国桥梁建设的飞速发展,斜拉桥跨度的增大,使得索塔越来越高。多采用横梁将斜拉桥两侧桥塔联结起来,形成横向框架结构,用以抵抗横向的风力或地震作用。由于上横梁具有结构尺寸大、高度高等特点,从而导致横梁施工支撑体系高度大、承载能力大,支架施工质量不易控制。

上横梁支撑体系有落地钢管支架法和悬空预埋托架法两种施工方法,针对高塔而言,落地钢管支架施工耗材大,且需在塔肢上进行大量预埋,施工周期长,拆除及周转不易。一般的横梁托架采用索塔两侧安装焊接三角托架,为满足现浇承载力要求,三角托架结构尺寸大、片数多,与预埋件采用焊接连接,焊缝受力大,对焊缝质量要求极高,安全风险大。

西江特大桥主桥索塔上横梁现浇采用托架进行施工,结合有限元设计软件,对托架结构进行优化、验算,采用牛腿作剪力键,通过装配桁架式托架进行受力,可大大提高材料利用率和支架的安全性,确保斜拉桥施工质量。

1 工程概况

跨西江主桥采用 $(2 \times 57.5 + 172.5 + 600 + 4 \times 57.5)$ m 混合梁斜拉桥,主跨 600 m 跨越西江,结构总长 1 118.7 m,采用双 H 形双索面等高索塔结构形式,索塔全高分别为 200、208 m。上塔柱为两分离式竖直塔柱;中塔柱为两分离式倾斜塔柱,向内侧倾斜;下塔

- *****
- [5] 周琰,靳世久,张昀超,等.分布式光纤管道泄漏检测和定位技术[J].石油学报,2006(2).
 - [6] 高文傲,刘洋,李登科,等.基于光纤监测技术的燃气管道泄漏研究[J].中国安全科学学报,2018(8).
 - [7] 唐天国,陈春华,刘浩吾.分布式光纤传感用于大坝基座裂缝监测[J].传感技术学报,2008(10).
 - [8] 施斌,徐学军,王楠,等.隧道健康诊断 BOTDR 分布式光纤应变监测技术研究[J].岩石力学与工程学报,2005(15).
 - [9] 刘杰,施斌,张丹,等.基于 BOTDR 的基坑变形分布式监

测实验研究[J].岩石力学,2006(7).

- [10] 丁勇,王平,何宁,等.基于 BOTDA 光纤传感技术的 SMW 工法桩分布式测量研究[J].岩土工程学报,2011(5).
- [11] 张巍,吕志涛.光纤传感技术用于桥梁监测[J].公路交通科技,2003(3).
- [12] 徐洪钟,施斌,张丹,等.基于小波分析的 BOTDR 光纤传感器信号处理方法[J].光电子·激光,2003(7).
- [13] 元四华,费业泰.应用时间序列移动平均模型预测加工精度的研究[J].计量与测试技术,2002(2).

收稿日期:2019-12-02

基金项目:中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目(编号:16-B01)

作者简介:王鹏,男,博士,高级工程师.E-mail:417084328@qq.com

柱亦为两分离式倾斜塔柱,向外侧倾斜。上塔柱和中塔柱在索塔锚固区下方设置上横梁;中塔柱和下塔柱在主梁下方设置下横梁,索塔结构如图 1 所示。

上横梁混凝土总方量 391.9 m^3 ,设计 40 束预应力束,上横梁结构如图 2 所示。

2 上横梁施工方案

索塔塔肢施工采用液压自爬模分节浇筑,单次浇筑节段高度 6 m,上横梁结构与相应塔肢节段采用同步浇筑工艺。上横梁为全预应力混凝土结构,采用托架现浇的施工方案。

大型托架结构自身承载大,结构受力复杂,施工精度要求高,考虑托架结构加工质量和现场安装的可操作性,方案选定为装配桁架式支撑托架。首先将索塔两肢内侧剪力键结构安装和对拉到位,再将承重横梁安装就位,最后进行托架主桁结构的分组整体吊装;主桁系统安装完成后,依次安装排架和分配梁,铺装模板系统,完成上横梁托架安装。

待上横梁混凝土浇筑完成并张拉完成后,进行上横梁托架结构拆除,受空间条件限制,主桁结构拆除采用空中双向转体拆除工艺。

3 托架结构设计与分析

3.1 托架结构设计

上横梁托架结构设计为装配桁架式支撑体系。上横梁托架结构布置见图 3。

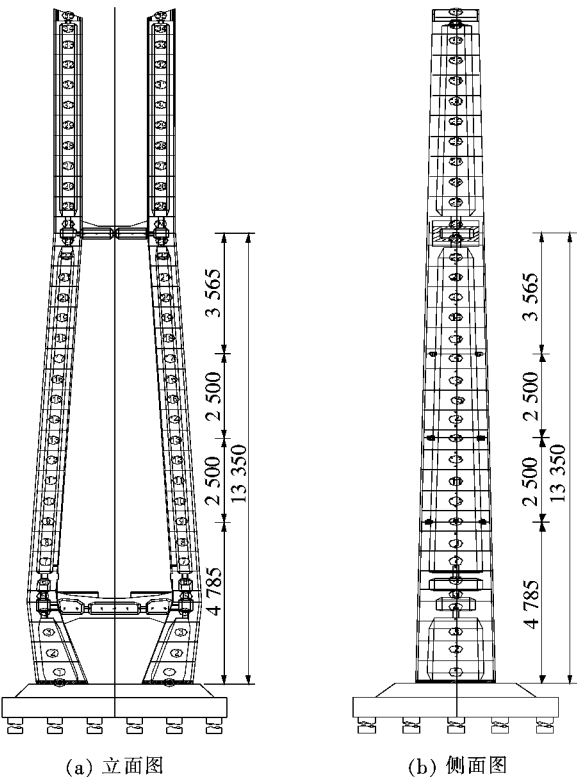


图 1 索塔结构示意图(单位:cm)

索塔上横梁采用等宽度变高度截面,截面全宽 8 m,高 4.5~7.5 m,内部设计一道 0.8 m 宽的横隔梁,

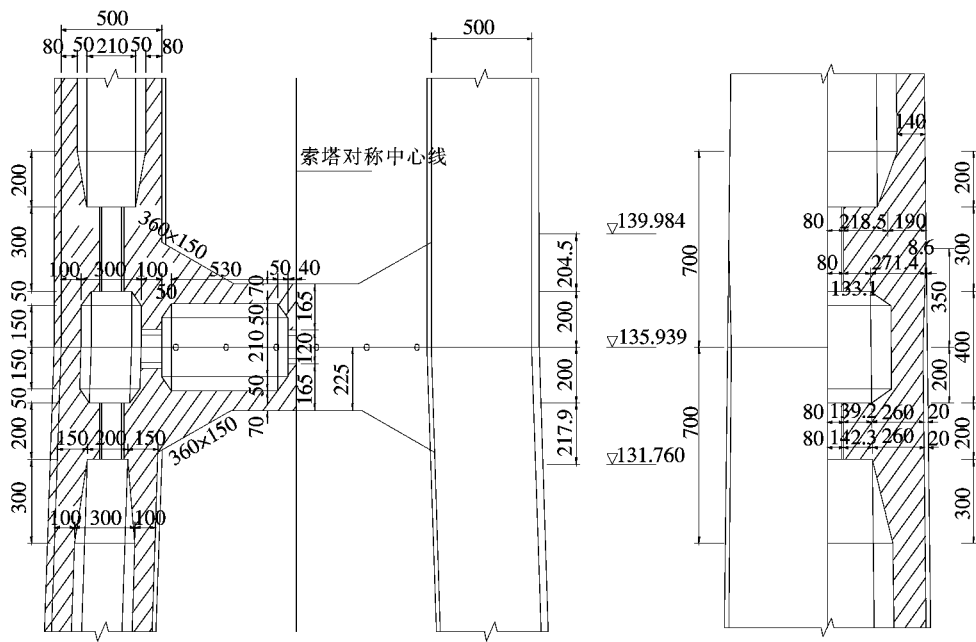


图 2 索塔上横梁结构示意图(单位:除标高为 m 外,其余:cm)

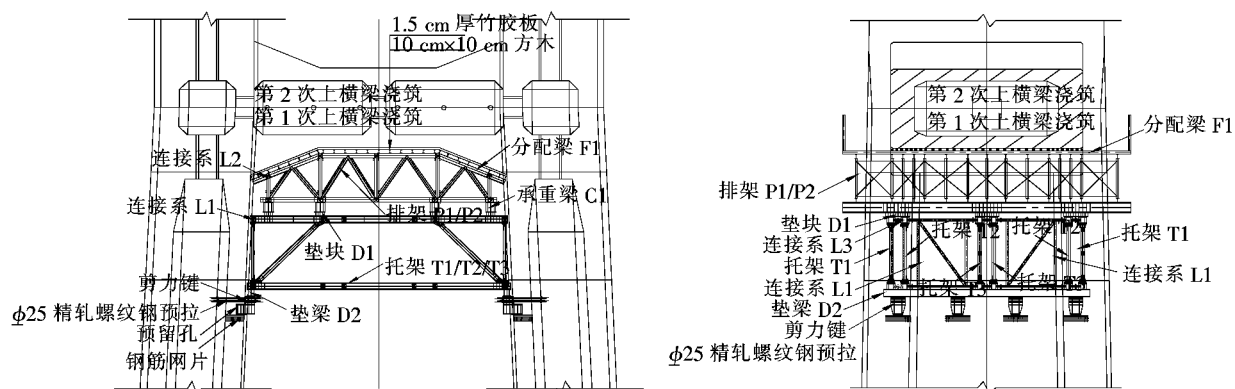


图 3 上横梁托架结构示意图

托架承重支点采用埋入式剪力键,并采用 $\phi 32$ mm 精轧螺纹钢对拉,剪力键采用全焊接板单元形式,单侧塔肢布置 4 个剪力键,共计 8 个剪力键,在每侧剪力键上安装垫梁,托架剪力键结构示意如图 4。

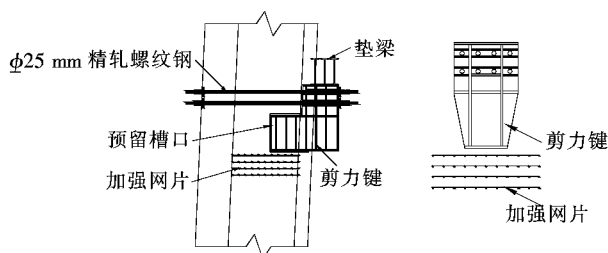


图 4 埋入式剪力键结构示意图

托架主桁系统安装在垫梁上方,采用 HN350 × 175 型钢制作,以两片为一组,共设置 6 组。主桁系统加工为装配式,桁架各杆件间采用销轴连接,各桁架间连接系采用法兰连接,形成空间稳定支承体系,桁架结构及装配示意图 5、6。

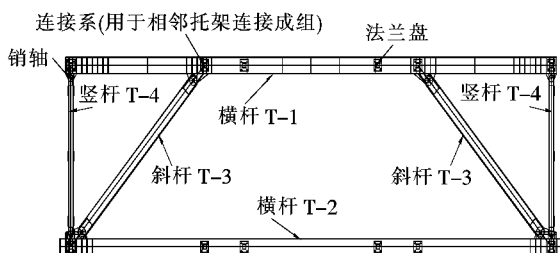


图 5 桁架结构示意图

主桁系统上方依次为垫块、承重梁、排架、分配梁及模板系统。

3.2 结构有限元分析

托架结构体系采用桥梁结构通用有限元分析与设计软件 Midas/Civil 进行建模分析,桁架、承重梁、排架、分配梁等结构采用梁单元模拟,对剪力键位置处垫

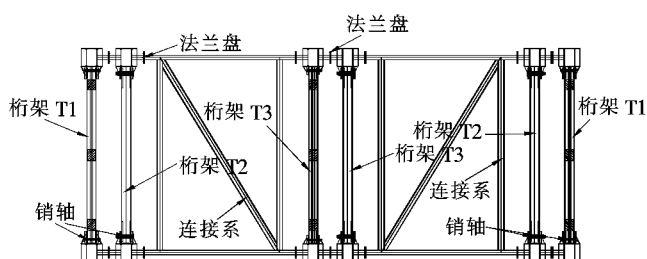


图 6 桁架拼装示意图

梁按照一般刚性固结添加,即约束 D_x 、 D_y 、 D_z 、 R_x 、 R_y 、 R_z 各项自由度;其他部位托架与横梁,横梁与分配梁间采用弹性连接,释放杆件长度方向转动值;剪力键分别采用板单元和 FEA 的实体单元进行建模分析。

支架设计按照横梁全荷载考虑,并以线荷载形式添加于分配梁上,支架荷载考虑结构自重、横梁钢筋混凝土荷载、模板荷载、施工机械荷载、振捣混凝土荷载、倾倒混凝土荷载、风荷载等。Midas/Civil 程序对支架自重自动计算,横梁钢筋混凝土结构重量考虑 1.05 倍扩大系数,上横梁托架及剪力键分析模型见图 7、8。

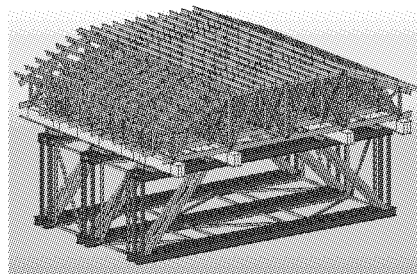


图 7 上横梁托架分析模型

按最不利原则,考虑两种工况对索塔上横梁施工托架进行结构计算分析。

工况 1:空载状态。该工况下,上横梁模板系统已安装,但未进行混凝土浇筑,风压选取最大风速 37.3 m/s 状态(台风风速调查)下风压。此时托架处于承受

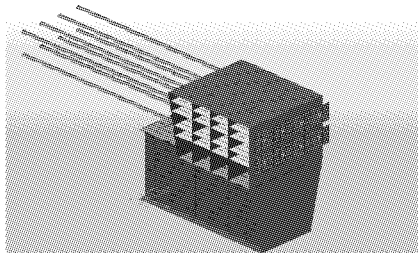


图 8 上横梁托架剪力键分析模型

水平荷载作用最不利状态。

工况 2:混凝土浇筑状态。混凝土选取风速不超过 13.8 m/s 时进行浇筑。当混凝土刚浇筑完成,此时托架处于承受竖向荷载作用最不利状态。

分析计算采用容许应力法,针对两种工况设立强度计算组合、刚度计算组合和屈曲稳定计算组合分别进行验算,两种工况下结构最不利受力结果如表 1、2 所示。

表 1 上横梁托架结构计算结果

托架结构部件	正应力/ MPa	容许值/ MPa	剪应力/ MPa	容许值/ MPa	安全性
分配梁	55.04	182	32.52	104	安全
排架	41.96	182	3.55	104	安全
承重梁	43.10	182	33.66	104	安全
托架上弦	128.82	182	79.01	104	安全
托架下弦	24.97	182	10.03	104	安全
托架斜杆	88.75	182	0.34	104	安全
托架竖杆	98.97	182	0.52	104	安全
连接系	144.77	182	26.44	104	安全
剪力键	250.00	273			安全

表 2 上横梁托架屈曲稳定模态分析结果

序号	模态	屈曲稳定系数	安全性
1	模态 1	147	>6 安全
2	模态 2	184	>6 安全
3	模态 3	185	>6 安全
4	模态 4	199	>6 安全
5	模态 5	200	>6 安全
6	模态 6	211	>6 安全

由表 1 可知:托架结构各部件受力均满足规范要求。由表 2 可知:托架结构最小临界荷载系数为 147,屈曲模态为侧向屈曲,满足规范要求。该托架系统设置合理可行。

4 上横梁塔梁同步施工关键技术

上横梁采用塔梁同步施工工艺,保障了塔、梁钢筋工程及混凝土工程的紧密结合,且大大地缩短了施工周期,其施工工艺流程见图 9。

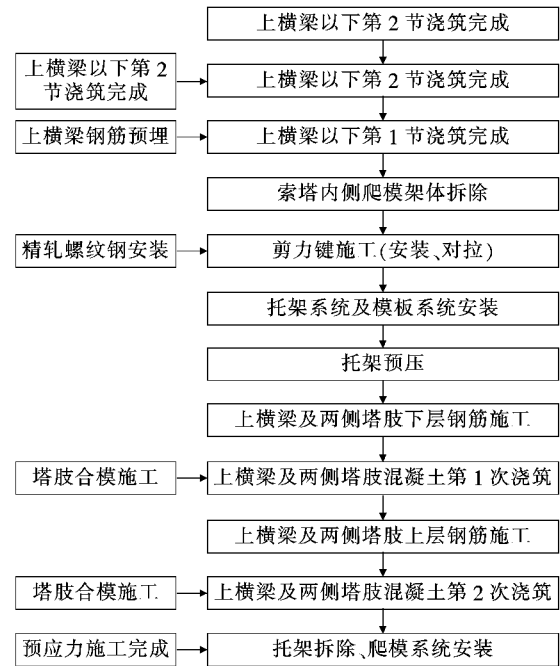


图 9 上横梁塔梁同步施工流程图

4.1 剪力键锚固系统施工

当索塔液压自爬模施工至上横梁以下两节(6 m/节)时,分别预留埋入式剪力键槽口和精轧螺纹钢对拉孔道。在塔肢混凝土浇筑前将自加工木质方盒固定于模板上作埋入式剪力键槽口预留,对受影响需截断的塔肢主筋在槽口上下面预留钢筋套筒,用于支架拆除后恢复主筋。并预埋 $\phi 48 \times 3.5$ mm 钢管用作 $\phi 32$ mm 精轧螺纹钢预留孔道。

剪力键安装前,首先安装固定对拉精轧螺纹钢,随后塔吊吊装拼装完成后的剪力键对孔安装,剪力键就位后采用穿心式千斤顶预拉精轧螺纹钢至设计吨位。

为保证预拉后剪力键下底面与槽口底面密贴,更好地完成荷载传递,对预拉完成后剪力键底部采用高强支座灌浆料进行灌浆处理。

4.2 装配桁架式支撑体系安装及拆除

上横梁托架结构主要分为上层排架和下层主桁架两部分,模板系统采用的则是大块钢模。主桁架及排架在钢结构加工场加工制造并完成预拼,主桁架杆件间采用销轴连接,排架采用全焊结构。

完成剪力键锚固施工后,利用塔吊安放垫梁结构,根据测量定位按先中间后两边的顺序安放 3 组托架主桁架,并完成连接系施工,连接系采用法兰与桁架连接。

主桁架施工完成后,利用塔吊分别吊装卸落块、承重横梁、承重排架结构。支架安装结构安装完成后,安装并固定分配梁,铺装底模系统。

上横梁支架采用混凝土预压块按 120% 施工荷载进行预压,以消除支架结构非弹性变形并计算其弹性变形。支架预压完成后重新调整支架标高,安装侧面模板,进行上横梁施工。

上横梁预应力工程施工完成后,首先拆除侧面钢模,随后进行上横梁支架拆除。割除卸落块完成支架结构脱模,并依次完成底模系统、分配梁、承重排架、承重梁、垫块的拆除。托架主桁架拆除受条件限制,采用荡移+空中双向转体拆除的施工工艺。

上横梁侧面两组主桁拆除利用塔吊采用荡移法完成,中间一组主桁通过横梁上预留孔洞下放纤维吊带进行横梁结构双向转体、下放、旋转、吊点转换等工序,完成上横梁支架拆除。

4.3 上横梁钢筋、预应力工程安装

采用同步施工工艺,避免了异步施工中钢筋截断于同一截面的问题,有效地保证了钢筋工程的施工质量。上横梁共计设计 40 束钢绞线,钢绞线波纹管定位及线形控制是施工过程控制的重点项目,通过定位胎架控制波纹管位置及线形。为保证波纹管密封性良好,混凝土浇筑前对波纹管进行通水试验,检验波纹管连接施工质量。

4.4 上横梁混凝土工程施工

上横梁混凝土施工分两次浇筑,首次浇筑上横梁底板及腹板部分混凝土,第 2 次完成全部混凝土施工。待混凝土强度、弹性模量和龄期达到设计要求后,对上横梁腹板部分预应力进行张拉。上横梁支架属于桁架梁结构,整体结构受力简单明确,支架结构跨中弯矩和挠度最大,剪力键位置承受全部上部结构荷载,因此上横梁混凝土浇筑应从横梁中部向塔肢方向浇筑。

5 结 论

依托西江特大桥跨西江 600 m 混合梁斜拉桥超

高索塔上横梁装配桁架式支撑体系进行研究,得出以下结论:

(1) 该托架采用埋入式剪力键结构,大大减小了托架结构尺寸,且使得托架结构体系受力明确,减少了对现场施焊质量的依赖,现场施工质量更有保障,承载性能可靠,安全性高。

(2) 采用装配桁架式支撑体系,主桁架杆件间采用销轴连接,有效地释放了桁架杆件弯矩,减小了杆件受力。与连接系间采用法兰盘连接,避免了焊接质量不达标、对杆件造成损伤等可能性,保证了桁架结构施工质量。

(3) 由现场施工实际可知,采用该装配桁架式支撑体系,施工周期短,安全性高,现场施工质量有保障,且该托架体系可多次周转利用,托架加工所需钢材少,经济效益高。

索塔上横梁装配桁架式支撑体系施工技术的成功实践,为今后同类型超高索塔上横梁结构施工提供了可靠的经验。

参考文献:

- [1] 代皓,张瑞霞,张敏.黄冈公铁两用长江大桥桥塔施工技术[J].桥梁建设,2012(5).
- [2] 张德志,张敏,代皓,等.黄冈公铁两用长江大桥桥塔上横梁施工技术[J].桥梁建设,2013(3).
- [3] 靳会武.泰州长江公路大桥横梁施工支撑牛腿设计[J].徐州建筑职业技术学院学报,2009(4).
- [4] 易季爱,宋达,易继武.荆岳长江公路大桥 29# 墩索塔上横梁施工新工艺[J].中外公路,2010(5).
- [5] 周小毛.鹦鹉洲长江大桥 1 号塔塔柱快速施工技术[J].科技视界,2015(13).
- [6] 赵成贵.公安长江大桥主塔上横梁施工技术[J].上海公路,2019(3).
- [7] 李陆平.高塔上横梁牛腿支架设计与施工技术[J].价值工程,2016(16).
- [8] 郭常瑞,黄晓星,胡学伟.马普托大桥索塔上横梁牛腿支架法施工技术研究[J].公路交通科技,2018(S1).
- [9] 邓文武.斜拉桥主塔上横梁施工技术研究[J].山西建筑,2018(20).
- [10] 郭志永.基于平衡力系的斜拉桥桥塔上横梁施工托架设计[J].铁道建筑技术,2017(5).
- [11] 常志军.南宁大冲邕江特大桥北岸索塔上横梁施工技术[J].铁道建筑技术,2014(S1).