

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.02.019

门式桥塔塔柱临时支撑及上横梁支架方案研究

李秋萍

(上海同豪土木工程咨询有限公司, 上海市 200092)

摘要: 为保证门式内倾桥塔施工的安全和倾斜度满足要求, 对某特大跨度悬索桥桥塔施工临时支撑及上横梁支架方案进行分析比选, 提出受力安全、经济合理的施工方案, 并对其进行相关受力分析。研究表明: 上横梁与塔柱采用异步施工可以提高施工效率, 简化模板系统; 对于未形成门式结构的倾斜塔柱, 需通过临时支撑并施加主动水平力保证塔柱受力和线形; 上横梁模架系统采用分离式三角托架方案, 方便施工、经济适用、安全可靠, 为类似倾斜高塔施工提供相关经验。

关键词: 门式内倾桥塔; 异步施工; 塔柱临时支撑; 主动水平力; 上横梁支架

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)02-0082-04

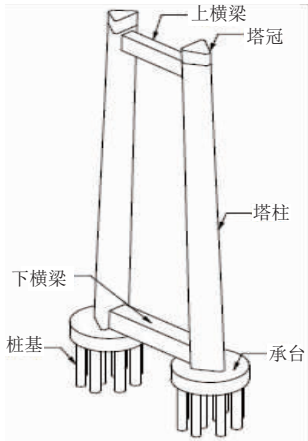
0 引言

悬索桥作为跨越能力最强的桥型, 常运用于跨大江、大河的特大桥, 其中索塔通过主缆承载着全桥之重, 是悬索桥结构重要的受力构件, 保证桥塔的可靠性是悬索桥设计和施工的关键。悬索桥的景观也主要通过桥塔形态来体现, 多样化的桥塔造型丰富了悬索桥的建筑景观, 也给施工带来了一些挑战。

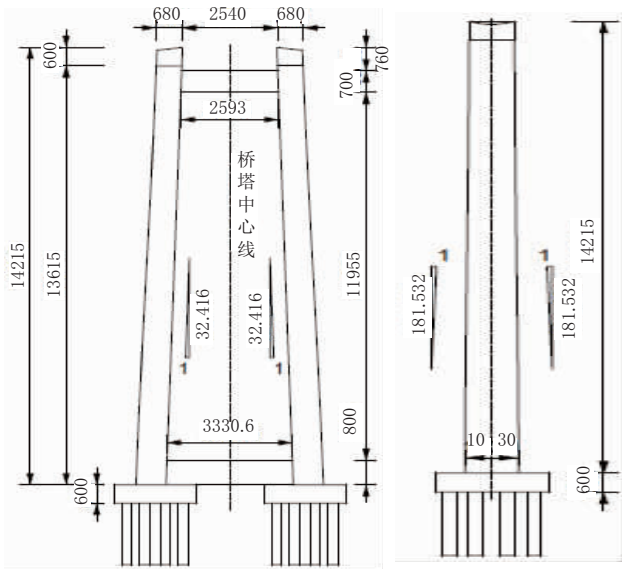
某悬索桥索塔采用门式内倾桥塔, 见图1。主塔总高约142 m, 横桥向内倾斜度为1:28.344, 下设8 m×6 m (高×宽) 矩形下横梁, 上设7 m×4 m (高×宽) 箱型上横梁, 均采用C55混凝土。主塔采用带切角的三角形截面, 截面尺寸由8.0 m×10.25 m (横桥向×顺桥向) 过渡到6.8 m×8.75 m。主塔内腔设置内径3.2 m×12 mm的钢圆筒, 钢圆筒通过剪力钉与混凝土主塔相连。上横梁采用预应力混凝土构件, 矩形截面, 高7.0 m, 宽4.0 m, 壁厚1.0 m, 横梁分两次浇筑。

本工程索塔存在2°的横桥向倾斜, 采用爬模法施工, 倾斜塔柱施工时应分高度设置主动横撑, 使其线形、内力和倾斜度满足设计要求并保证施工期结构的安全。

上横梁位于高空中, 上横梁现浇混凝土体量大, 支架系统多采用高空支架作为施工支架, 施工风险大, 从结构安全性、使用经济性以及施工工期等方面



(a) 三维示意图



(b) 立面图

(c) 侧面图

图1 索塔构造图(单位: cm)

考虑, 设计合理的支架方案具有重要意义。

本文针对横梁施工时序问题、倾斜塔柱临时支撑

收稿日期: 2023-02-27

作者简介: 李秋萍(1985—), 女, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

方案及横梁支架方案进行研究分析,制定相应的施工方案,取得良好效果,为同类桥梁施工提供参考。

1 横梁施工时序

本工程上横梁设置距离塔顶 7.6 m 位置,横梁施工可采用同步施工或异步施工^[1,2],两者各有特点,以下从结构受力、施工周期、施工风险等方面进行对比分析:

(1)结构受力:同步施工方案塔柱与横梁混凝土整体成型,整体性好,而异步施工塔柱与横梁之间存在施工缝,两者混凝土间存在龄期差异,存在接缝开裂和横梁出现收缩裂缝的风险;

(2)经济性:塔柱采用爬模施工,若横梁与塔柱同步浇筑,爬模支架不能适应梁柱结合位置的施工,该处需另外单独设置模板,经济性较差。

(3)施工周期:爬模支架在梁柱结合位置需进行拆卸和重新安装,施工周期长,且拆装爬模系统为高空作业,施工安全性较差。

综上所述,异步施工可以保证塔柱爬模连续施工,施工简便,工期短,经济性高,推荐采用异步施工方案,塔柱施工时预先埋入上横梁钢筋套筒,待智能顶升模架爬升后再连接上横梁钢筋与套筒。同时,在托架牛腿对应位置预埋定位板,牛腿安装时通过可周转螺栓栓接作为托架的受力支承点。通过控制横梁与塔柱浇筑混凝土间隔时间不超过 30 d、加强施工缝处混凝土表面凿毛、施工缝处补插锚固钢筋等措施避免施工缝产生收缩裂缝。

2 塔柱临时支撑方案研究

2.1 控制要求

由于桥塔向内倾斜,随着施工高度增加,塔柱根部弯矩会逐步增大,需通过分高度设置主动临时支撑控制塔柱应力及悬臂端挠度,根据《公路桥涵施工技术规范》^[3]:控制塔柱根部混凝土的拉应力不超过 1 MPa;根据《公路工程质量检验评定标准》^[4]:悬索桥混凝土塔柱轴线偏位不大于 15 mm,且相对于前一节段不大于 8 mm。

结合同类型桥塔施工经验^[5]、钢筋定尺长度及塔柱模板系统的设计,塔柱施工以 6 m 为分段标准,在下横梁施工时同时完成主塔 8 m 高后利用爬模工艺进行下一节主塔施工,塔柱全高分 22 个节段浇筑施工。塔柱临时支撑设置的道数、位置及主动力的施加方案以施工过程中塔柱应力不超过 1 MPa;悬臂顶

位移不超过 15 mm 为控制目标进行设计,可通过预偏使塔柱线形符合设计要求。

2.2 临时支撑计算

采用桥博 V4.4 对塔柱施工建立有限元模型,见图 2,模拟爬模节段施工,单元类型均采用梁单元模拟,总计 217 个单元。塔底采用固结简化模拟,地横梁被承台支撑处采用弹性支撑模拟,主动横撑与主塔采用铰接约束,托架与桥塔采用刚接约束,临时结构内部杆件均采用刚接模拟杆件间的焊接。

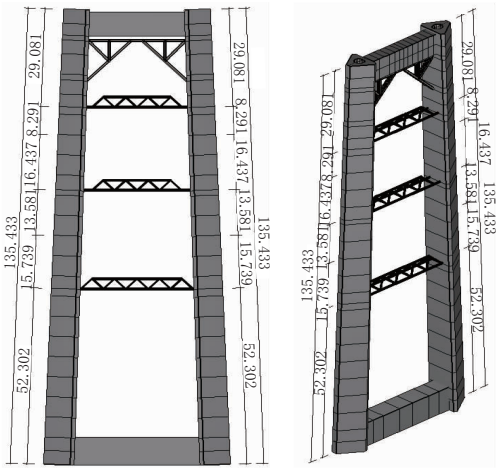


图 2 索塔有限元模型(单位:cm)

悬臂施工至第 10 节段(高 68 m),塔底角点应力约 0.94 MPa,塔顶位移为 14 mm,应力及位移均达到控制目标的极限状态,按爬模影响两个节段考虑,在第 8 节段施加第一道横撑,通过主动施加水平力,抵消部分自重引起的弯矩,减小塔底拉应力及塔顶位移。再逐段计算第二道、第三道支撑的设置和主动水平力。最终塔柱临时主动支架设置及对应塔柱应力、位移见表 1。

表 1 塔柱临时主动支架设置及对应塔柱应力、位移

节段	支撑主动水平力/kN	塔柱最大拉应力/MPa	塔柱最大位移/mm
10 节段		0.94	14.1
第一道支撑(8 节段位置)	1 200	-0.41	2.0
15 节段		-1.61	14.5
第二道支撑(13 节段位置)	1 000	-1.78	2.2
22 节段(塔顶)		-2.77	29.8
第三道支撑(17 节段位置)	1 000	-2.74	11.8
成塔(拆除临时支撑)		-2.60	18.1

计算表明,通过对横撑施加主动水平力,塔柱不出现拉应力,塔柱倾斜位移变小;悬臂施工至塔顶时,塔顶最大位移为 29.8 mm,成塔后最大位移为 18.1 mm,根据成塔位移适当设置预偏量,使塔柱线

形符合要求。

临时支撑采用管桁架结构,材质为 Q235 钢材,上、下弦钢管为 $D529 \times t8$ mm,腹杆及平联为 $D325 \times t8$ mm。托架采用三角牛腿支撑。横撑构造形式见图 3。

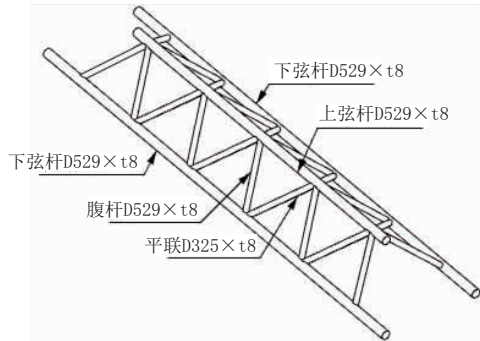


图 3 塔柱临时支撑结构示意图(单位:cm)

由于第一道横撑施加的主动动力最大,且后续节段施工均对其产生压力效应,第一道支撑受力最不利,计算表明:第一道横撑等效水平力由最初的 1 200 kN,到 15 节段悬臂施工增大至 2 398 kN;第二道横撑施加水平力后减小为 1 244 kN;悬臂施工至塔顶增大至 1 476 kN;第三道横撑施加水平力后减小为 1 190 kN。第一道横撑最不利受力工况为悬臂施工至 15 节段(未施工第二道横撑主动力前),对应基本组合应力状态见图 4。



图 4 第一道横撑应力状态图(单位:MPa)

在基本组合下,主动横撑最大应力为 152.5 MPa,对应考虑稳定折减应力为 $166.6 \text{ MPa} < 190 \text{ MPa}$;屈曲稳定系数为 $10.32 > 4$,横撑受力满足要求。

3 上横梁支架方案研究

3.1 支架方案比选

本工程上横梁按全预应力混凝土构件设计,采用矩形截面,高 7.0 m,宽 4.0 m,壁厚 1.0 m。施工图按分两次浇筑设计,第一次浇筑至半高 3.5 m 位置,待第一批钢束张拉压浆完后再浇筑上层混凝土,即第一批混凝土浇筑形成结构后支撑第二批混凝土浇筑,上横梁支架主要承担第一次横梁浇筑荷载,见图 5。

横梁现浇支架设计应根据索塔结构特点、施工条件等因素选择合的结构形式,支架的结构形式可分为:落地式支架、牛腿支撑架、三角托架支撑架、劲

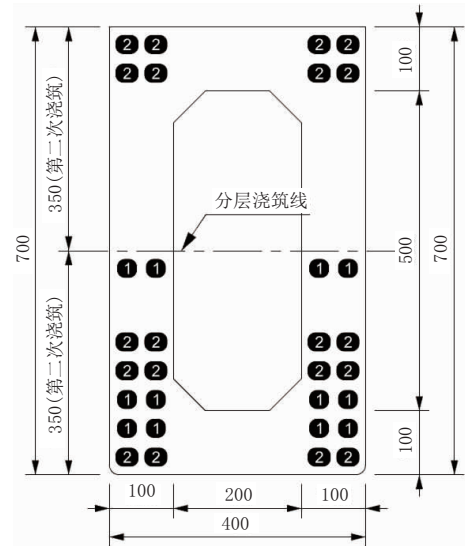


图 5 上横梁浇筑及钢束分批张拉示意图(单位:cm)
性支撑架等,见图 6。

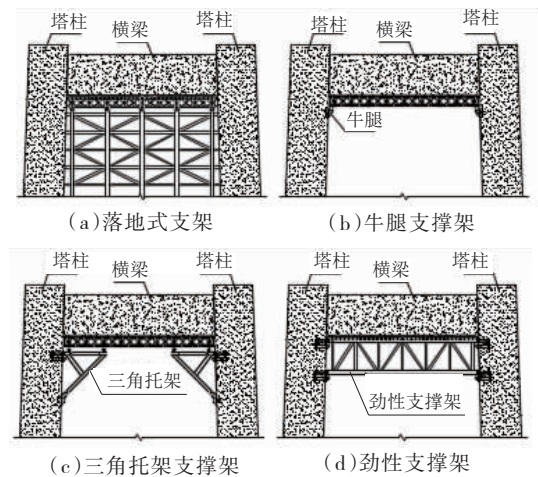


图 6 横梁支架方案示意图

对上述方案从结构受力、施工简便性、工期及经济性等角度进行比选,比选见表 2。

综上所述,本工程上横梁距离地面高度达到 120 m,跨度约 26 m,综合考虑各方面因素,推荐采用施工简便、受力明确、造价经济的三角托架支撑架方案。

3.2 三角托架支撑架构造

本工程上横梁支架由三角托架、型钢横梁、贝雷梁、分配梁几部分组成,见图 7。

纵桥向设置三榀三角托架,托架间距 1.5 m,单榀托架在地面制作完成,利用塔吊吊装到位后,将托架根部连接钢板与塔内预埋钢板焊接;在三角托架顶面根部、端部设置两道横梁,横梁采用双肢 $HN600 \times 200$ 型钢;横梁上方架设由贝雷梁形成的主梁,合计 16 榀,贝雷梁主梁在地面制作完成,采用塔吊单榀进行吊装,第一榀主梁吊装到位后采用槽钢进行支撑防止发生倾覆,后续各榀主梁吊装到位后与前一榀主梁之间焊接平联及斜撑,以增强其稳定性。

表 2 上横梁支架方案对比

支架方案	落地式支架	牛腿支撑架	三角托架支撑架	劲性支撑架
方案描述	在地面设置支架基础、通过从底到顶设置竖向支撑系统	在塔柱上安装牛腿, 钢桁架通过牛腿将何在传递给塔柱	在塔柱上安装三角托架, 钢桁架通过牛腿将何在传递给塔柱	将支撑行架直接与塔柱固结, 形成临时支撑结构
结构受力	受力途径明确, 对于高度较高的支架, 稳定问题突出	牛腿集中受力, 构造受力较为复杂, 安全风险较大	通过三角托架分散传力给塔柱, 调整上、下支点距离可调整其承载能力	支撑桁架与塔柱固结构造复杂, 传力途径较为复杂
施工工艺	构造简单, 工艺成熟, 支架越高, 安装难度及风险越大, 工期长	塔柱在牛腿区域预埋螺栓、剪力销等预埋件集中, 装卸较为复杂	支架承载力可通过三角托架上、下支点距离调节, 装卸简便较为简便	安装精度要求较高, 装卸麻烦
经济性	支架高度大时, 造价最高	用钢量最小	用钢量较小	用钢量较小
适用范围	离地高度较低的横梁	跨度较小的横梁	跨度较大的横梁	跨度较小的横梁

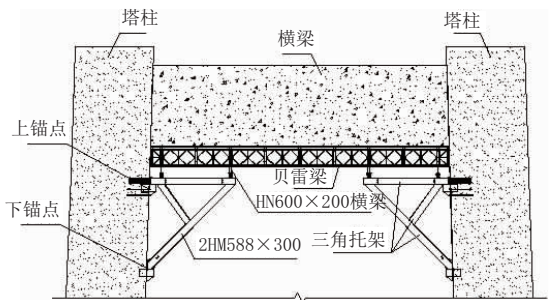


图 7 三角托架支撑架构造示意图

三角托架上锚点牛腿(见图 8)主要承受托架传递的拉力和剪力,通过精轧螺纹钢、预埋异形钢板与塔柱连接,精轧螺纹钢对拉抵抗牛腿的拉、弯效应,异形钢板作为牛腿腹板承担剪力效应。三角托架下锚点牛腿(见图 9)主要承担压力和剪力,压力通过牛腿壁板与塔壁接触传递,异形钢板作为牛腿腹板承担剪力效应。

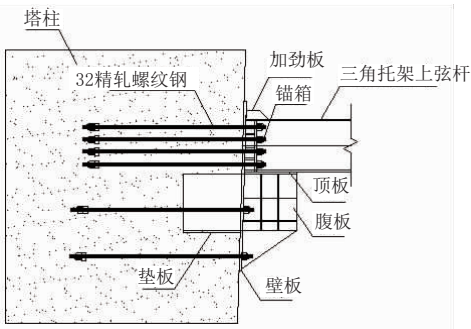


图 8 上锚点牛腿构造示意图

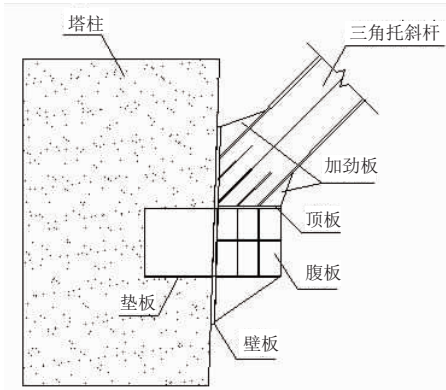


图 9 下锚点牛腿构造示意图

3.3 支架受力分析

计算采用桥博 V4.4 对横梁支撑系统建立有限元模型,计算模拟横梁分层浇筑施工,上横梁采用主附截面模拟分层浇筑,考虑横梁、支架系统和模板系统自重、施工荷载等作用。支架强度验算时,按承载能力极限状态进行计算,结构重要性系数取 1.1,支架自重、模板自重、混凝土自重系数取 1.2,施工荷载取 1.4。

三角托架受力情况见图 10。在基本组合下,三角托架最不利杆件为下斜杆,最大应力为 77 MPa (压),对应考虑稳定折减应力为 81 MPa<190 MPa,托架受力满足要求。

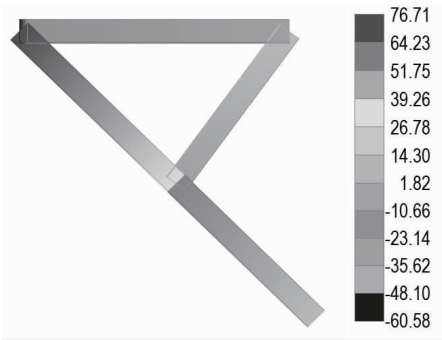


图 10 三角托架受力分布图(单位:MPa)

贝雷梁由 4 道型钢横梁支撑,形成 6 m+12 m+6 m 三跨连续结构,基本组合下,贝雷梁最大正应力为 256 MPa<295 MPa,最大剪应力为 50 MPa<175 MPa,贝雷梁受力满足要求。

计算表明:型钢横梁、锚点精轧螺纹钢、螺杆、牛腿腹板、混凝土局部承压均能满足要求。

4 结 语

本文以特大跨度悬索桥内倾桥塔施工为工程背景,首先对上横梁施工时序上进行分析,确定了横梁异步施工方案;再结合内倾桥塔悬臂施工中受力,设

(下转第 109 页)



图5 景观河道排涝路径图

系规划》,项目地块属于南村围,规划防洪(潮)标准为200 a一遇,现状尚未达到200 a一遇防洪标准要求。但本项目地块位于外江堤防的管理范围以外,不会影响到后期堤防的达标建设。

为满足河道景观需要,需对项目范围内原有的罗边涌上游段河道进行扩宽和延长。项目范围内景观河进行调整后,河道水面率、河道容积、河宽等均满足《广州市河涌水系规划(2017~2035)》的要求。

根据《华南理工大学广州国际校区二期景观河道及配套水闸工程初步设计报告》,本项目所涉及的景观河设计防洪标准为20 a一遇,排涝标准为50 a一遇24 h暴雨不成灾,满足规划要求。

3.5 雨水管渠设计标准适应性评估

本项目设计雨水管道标准为5 a一遇,且不属于

特别重要地区,雨水管渠设计标准满足规划要求^[3]。

4 结 语

(1)为落实源头治理的理念,从项目策划阶段开始落实城市内涝治理要求,以华南理工大学广州国际校区二期工程洪涝安全评估为例,阐述了建设项目洪涝安全评估过程。首先对城市建设项目策划方案阶段、控制性详细规划阶段的评估要点进行分析;其次规定了评估方法;最后给出了策划方案阶段、控制性详细规划阶段的洪涝安全评估目录。

(2)项目范围景观河河涌排涝能力为20 a一遇标准,该区域内涝防治设计重现期可达100 a,并满足雨水排放需求。

参考文献:

- [1] 代志伟,毛中豪,郑嘉璇,等.快速城镇化形势下广州市洪涝安全评估——以从化小海河片区为例[J].中国防汛抗旱,2022(2):14.
- [2] 林伟毅.华南理工大学广州国际校区一期工程智慧校园建设方案[J].中国住宅设施,2021(12):25.
- [3] 唐陈杰,袁洪州.海绵城市规划目标指标体系构建研究——以南沙新区海绵城市建设为例[J].绿色科技,2020(8):19.
- [4] 王秋生.关于珠江河口的规划与治理[C]//中国江河河口研究及治理、开发问题研讨会.广州:水利部珠江水利委员会,2002:44-49.
- [5] 梁超武,吴勇槐.花都某水闸过流能力复核分析[J].广东水利水电,2011(6):3.
- [6] 广州市水务局.广州市海绵城市规划设计导则(试行)[Z].穗水[2017]247号,2017.
- [7] 查理.MIKE FLOOD耦合模型在城市超标准洪水防御预案中的应用[J].水利技术监督,2021(3):1.

(上接第85页)

计塔柱临时支撑,通过施加主动力控制施工过程中塔柱受力及变形;最后,对上横梁支架方案进行比选,制定相应的横梁支架方案,对其支架系统进行结构受力分析。研究成功运用于本桥桥塔的施工,起到了降低施工成本、节省工期、降低施工难度、提高施工质量的作用,为以后类似的工程提供了新的思路,具有较强的借鉴和指导价值。

参考文献:

- [1] 陶龙,徐国挺,邓亨长,等.赤水河红军大桥门式框架桥塔施工关键技术[J].世界桥梁,2020,48(1):30-34.
- [2] 张德致,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,2013,43(3):5-10.
- [3] JGJ/T 3650—2020,公路桥涵施工技术规范[S].
- [4] JTG F80/1—2017,公路工程质量检验评定标准[S].
- [5] 查道宏,李军堂,胡勇.大跨度斜拉桥钢筋混凝土桥塔快速施工技术发展与展望[J].世界桥梁,2022,50(4):32-40.