

花瓶型斜拉桥塔梁固结主塔 π 型下横梁施工支撑体系研究与应用

曹景伟¹, 李浩铭², 黄星亚²

1. 浙江交投高速公路建设管理有限公司, 浙江 杭州 311300

2. 浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311300

摘 要 : 花瓶型斜拉桥塔梁固结体系的主塔 π 型下横梁作为关键传力结构, 其施工质量直接影响桥梁整体受力性能与耐久性。其中支撑体系的设计是下横梁施工的关键环节, 决定了下横梁施工质量的成败。本文以景文高速高岭头水库特大桥索塔下横梁支架工程为背景, 从下横梁施工特点、解决方法、方案比选分析、主要施工方案、实施后的效果进行简要阐述, 针对 π 型下横梁支撑体系工程应用验证了该技术的可行性与经济性, 可为同类桥梁结构的施工提供经验与参考。

关 键 词 : π 型下横梁; 施工特点; 方案比选; 支撑体系;

Research and Application of Construction Support System for Tower Beam Consolidation of Main Tower π -type lower Beam of Vase Cable-Stayed Bridge

Cao Jingwei¹, Li Haoming², Huang Xingya²

1.Zhejiang Jiaotou Expressway construction management Co. LTD. Hangzhou, Zhejiang 311300

2.Zhejiang Jiaogong Hongtu traffic construction Co. LTD. Hangzhou, Zhejiang 311300

Abstract: The π -type lower beam of the main tower in the tower beam consolidation system of vase cable-stayed bridge is the key force transfer structure, and its construction quality directly affects the overall mechanical performance and durability of the bridge. The design of the support system is the key link of the construction of the lower beam, which determines the success or failure of the construction quality of the lower beam. This paper takes the lower beam support project of cable tower of Jingwen high-speed Gaoling Toushuikute Bridge as the background, and briefly expounds the construction characteristics, solution, scheme comparison analysis, main construction scheme and implementation effect of the lower beam, and verifies the feasibility and economy of this technology for the engineering application of π -type lower beam support system, which can provide experience and reference for the construction of similar bridge structures.

Keywords: π -type lower beam; construction characteristics; scheme selection; supporting system;

引言

随着大跨度斜拉桥向高塔、长跨、轻量化方向发展, 塔梁固结体系因其整体刚度高、抗震性能优的特点被广泛应用。主塔下横梁作为塔柱与主梁的固结节点, 承担着传递索力、协调塔梁变形的关键作用。传统矩形截面横梁因自重较大、应力分布不均等问题, 逐渐被 π 型截面取代, 但其空间构造复杂、预应力体系密集、施工荷载耦合效应显著, 对施工工艺提出了更高要求。

当前, 国内外学者针对斜拉桥下横梁施工已开展了部分研究, 如混凝土裂缝控制、下横梁的施工全过程力学行为分析、预应力张拉时序影响及塔梁协同变形控制等, 但在支撑体系设计分析方面存在不足, 同时, 塔梁固结区在施工过程中因支撑体系稳定性问题会造成重大安全责任事故。

本文以景文高速高岭头水库特大桥为工程依托, 聚焦 π 型下横梁施工关键技术, 创新提出非落地支架支撑体系, 解决了在高塔高空有限作业环境下的下横梁施工支架设计与应用问题, 应用成果不仅解决了实际工程难题, 也可为类似桥梁结构的施工提供经验与参考。

一、下横梁施工特点

在塔梁固结体系桥梁中，主梁顶面与主塔下横梁顶面位于同一标高，属于主梁节段划分中的0号块，整个主梁0号块包含了主塔下横梁及其大小里程顺桥向的悬臂梁，主塔下横梁通常采用单箱单室截面，该结构处作为下塔柱和中塔柱的交点，钢筋密集，混凝土浇筑量大，施工荷载大，受力十分复杂，其施工质量对全桥的结构安全起着至关重要的作用，而且直接影响后续部位工程的施工。因此，下横梁的支撑体系设计决定了其施工质量的成败，具有不可逆的工程特性^[1]。

二、解决方法

目前，0号块现浇施工通常采用满堂（钢管）支架、或者劲性牛腿膺架。当0号块距离地面不高且有满堂（钢管）支架搭设

场地时，常采用满堂（钢管）支架工艺。当施工连续刚构桥梁0号块时，采用劲性牛腿膺架，劲性牛腿膺架一般采用万能杆件、贝雷梁、“321”公路梁等拼装，膺架与塔柱的连接采用预埋钢板焊接、预埋工字钢作支撑等形式。当斜拉桥主梁底面为水域或者距离地面较高时，采用满堂（钢管）支架不仅施工困难、成本巨大，而且安全系数低。而采用其它劲性牛腿膺架，又无临时拉索体系支撑，支架刚度控制困难，加之支架与塔身的连接通常为焊接，存在较大安全隐患，后期对预埋钢板的处理也比较困难。因此，需要寻求一种其它结构形式的现浇支架，即非落地式支架工艺进行高塔下横梁施工^[2]。

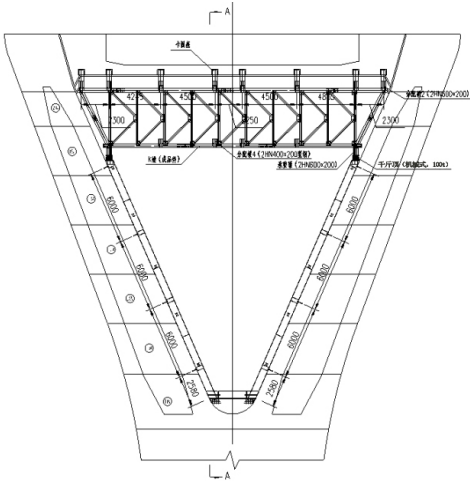
三、方案比选分析

方案比选分析表（高塔环境下）

方案	测算工期（天）	材料投入	吊装量	施工难度	风险系数	费用（万元）	适用性
落地支架	长，经测算，从支架搭设到完成混凝土浇筑总工期需60天	盘扣支架、一定数量的钢管、贝雷片、分配梁、方木	数量多，吊装重量较大	难度极大	极大	约400	不适用
劲性牛腿膺架	较长，经测算，从预埋到安装成型到完成混凝土浇筑总工期需50天	预埋件、钢板、牛腿膺架、分配梁、方木	吊装数量与重量较少	难度适中	较大	约260	适用
非落地式支架	较短，经测算，从支架搭设到完成混凝土浇筑总工期需45天	爬锥、高强螺栓、型钢斜撑、K型桁架、承重梁、分配梁、方木、机械式千斤顶	数量适中，桁架重量较重	难度最小	较小	约140	适用

四、支架设计

下横梁施工总荷载2500吨，根据支架受力计算分析，非落地式支架设计采用以下形式：塔柱内侧采用长20.58米双拼400H型钢斜撑，单侧各设置2道，底端采用同型号型钢进行连接，中间采用2I22a型钢K撑进行横向连接；底模采用CB450型K型桁架，共设置4樘；斜撑与K型桁架支点处采用100t机械式千斤顶、2HN600*200型承重梁；纵向分配梁采用2HN600*200及2HN400*200两种型号（图1）。



> 图1 下横梁支架平面图

五、主要施工方案

（一）施工准备

- （1）施工前，组织技术人员全面研究设计图纸，并将存在疑问之处提请设计单位予以明确，以充分了解设计意图。
- （2）进行混凝土配合比试验并进行优化。
- （3）完成现浇支架等临时结构的设计及受力计算。
- （4）做好主要施工设备选型，安排适时进场工作，并做好进场检验工作。

（二）现浇支架搭设

支架搭设步骤为：塔柱分叉段根部基础混凝土浇筑→塔肢预埋件安装→斜撑、水平撑及联结系安装→垫块及承重梁安装→K型桁架安装→K型桁架范围内三角形悬挑牛腿安装→横桥向分配梁安装→下横梁底模及侧模安装→施工下横梁下半部分→塔柱立面三角形牛腿安装→三角形悬挑牛腿与下横梁固结结构安装→下横梁上半部分盘扣支架安装→悬臂梁底模及侧模安装→施工上半部分下横梁^[3]。

① 基础混凝土浇筑

在下塔柱分叉段底部立模浇筑支架基础混凝土。浇筑前先铺设一层土工布，以便于后期基础混凝土的凿除，按设计要求在支架斜撑底端位置安装预埋钢板和钢筋网片。基础混凝土采用C50，浇筑过程中加强振捣以保证混凝土密实。

② 塔肢预埋件安装

随塔柱施工，在塔肢横桥向内侧及大小里程侧面按设计标高位置预埋 M42/D26.5 爬锥，用以固定斜撑及斜杆牛腿。

③ 斜撑及水平撑安装

塔肢内侧爬模拆除后，利用塔吊在塔肢内侧安装斜撑，单边塔肢内侧各安装 2 道双拼 400H 型钢斜撑，并采用 2I22a 作为横向连接系。吊装到位后通过爬锥将其固定于塔肢，并将杆件底部与基础预埋板焊接固定，然后安装单元间横向连接系，最后安装底部水平撑；吊装到位后通过爬锥将其固定于塔肢，并用螺栓杆件接头连接固定，然后安装单元间横向连接系^[4]。

④ 垫块及承重梁安装

先在斜撑顶部安装施工作业平台（4 片钢牛腿 + 踏板 + 护栏），然后依次安装钢垫块、千斤顶和承重梁。钢垫块采用 2cm 厚钢板制作，采用焊接方式固定于斜撑顶端。承重梁与斜撑之间设置 100t 机械式千斤顶用以调整支架顶面标高及后续支架的卸落，待标高调整到位后采用钢板垫平承重梁与垫块间缝隙，然后卸落千斤顶，使承重梁平稳落到斜撑上。

⑤ K 型桁架及连接杆安装

将运输进场的 K 型桁架构件在主塔下方场地拼装成型（单片桁架全重 18.6t），然后利用主塔两旁的塔吊同步起升抬吊安装，当 K 型桁架底面高于承重梁顶面 50cm 采用倒链将 K 型桁架牵引至安装位置，吊机缓慢松钩将其摆放于承重梁上，然后安装桁架限位件并采用角钢对 K 型桁架做临时支撑以防单榀桁架倾覆，最后吊机摘钩，依次吊装后续桁架，4 榀桁架全部吊装到位后，安装桁架下部连接杆，将 4 榀桁架连成一个整体。

⑥ 纵向分配梁及斜杆安装

将分段加工完毕的分配梁按设计要求进行连接，然后依次吊装到位，并按设计要求采用螺栓将其与 K 型桁架连接牢固。然后吊装依次吊装斜杆，并按设计要求将斜杆与分配梁（或牛腿）连接牢固。

⑦ 横向分配梁安装

将分段加工完毕的分配梁按设计要求连接为整体，然后利用塔吊依次吊装到位并采用焊接方式与纵向分配梁点焊固定。

⑧ 施工下横梁下半部分

铺设底模、安装钢筋、预应力、爬模爬升、浇筑混凝土。

（三）高空下横梁抗倾转结构安装

根据倾转荷载存在于横梁第二次浇筑的情况，利用第一次浇筑的下横梁设置抗倾转抵抗结构。在每个三角牛腿水平杆顶面下横梁两侧设置卡箍座结构，该结构与第一次已浇下横梁底板部分为面接触，仅传递、承受水平推力，将三角牛腿卡在下横梁上，限制三角牛腿水平杆的水平移动，从而限制牛腿及钢桁梁的倾转（图 2）。

① 确定下横梁组件的安装位置；

② 在三角牛腿底座上铺设分配横梁，分配横梁的铺设位置与下横梁组件的安装位置相对应；

③ 将下横梁组件安装至分配横梁上；

④ 确定卡箍座的安装位置，将卡箍座内的限位端板固定安装在下横梁的侧壁上；

⑤ 将卡箍底座与三角牛腿底座、限位端板焊接；

⑥ 焊接件固定安装至卡箍基座的卡接件内，并将焊接件焊接至三角牛腿上；

⑦ 在卡箍基座的两侧再铺设分配横梁。

（四）支架预压

预压荷载以浇筑混凝土工况下支架承受的全部荷载（第二次浇筑时钢筋混凝土实体重量 + 施工荷载）的 1.2 倍考虑，分 3 级进行加载，分别为预压荷载的 60%、100% 和 120%。

（五）模板安装

模板安装过程需与结构钢筋、预应力钢筋安装等工序交叉作业，总体安装顺序为：底模→侧模→内模→端模。

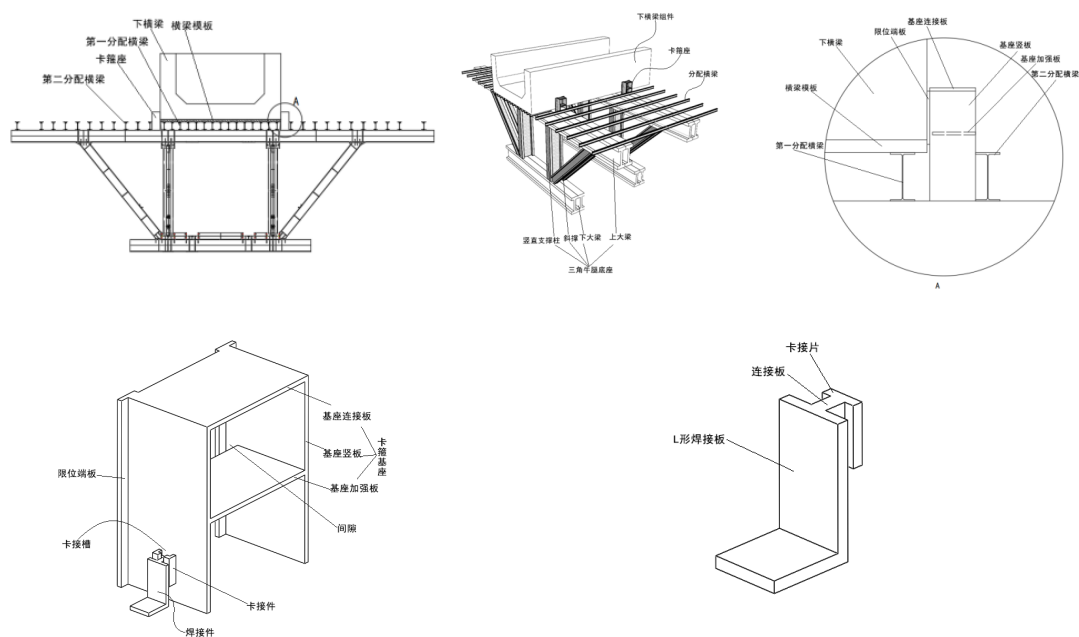


图 2 高空下横梁抗倾转结构安装示意图

（六）钢筋加工及安装

钢筋统一集中加工，现场安装。钢筋分两次绑扎，第一次绑扎下横梁底板、腹板一半高度、人洞钢筋以及相应的倒角钢筋，第二次绑扎下横梁一半腹板、下横梁顶板、 π 型悬臂段及相应的倒角钢筋。受力钢筋接头采用墩粗直螺纹套筒连接，其余钢筋接头采用绑扎或单面搭接焊。

（七）预埋件安装

按照设计图纸、桥梁监控单位要求做好主梁0号块附属工程预埋件、临时辅助设施预埋件和施工监控元件预埋。

（八）预应力管道及锚垫板安装

按设计要求完成锚垫板安装，锚垫板与预埋套筒栓接牢固，并对锚垫板表面上的压浆孔及连接螺孔用棉纱等材料填充，防止浇筑混凝土时泥浆渗入管道内或螺孔内。混凝土浇筑时，应严格封堵套筒，严防混凝土进入套筒内。

（九）混凝土施工

混凝土采用集中场拌，搅拌车运输至现场，通过布设在塔柱两侧的泵送管道，采用泵送方式进行混凝土浇筑。

（十）下横梁预应力张拉

按照设计要求对下横梁进行分两次张拉，采用智能张拉工艺。锚具采用成品Ⅰ类优质锚及其配套设备。

六、实施后的效果

本工艺利用了主塔上的预埋件为承重点，能与主塔结合良好，协同受力，保证了安装过程中桁架稳定性。支架的悬挑牛腿结构稳固、安全性高。通过支架卡箍座的设置，便于对三角牛腿底座与下横梁组件的水平位置进行固定，从而防止三角牛腿底座或下横梁组件受到水平载荷时发生倾转，结构简单，位置有利，施工操作方便，避免了采用其它较复杂结构需在高空悬空状态下作业的不利情况，提高施工的安全性（图3）。



> 图3 现场安装实物图

本工艺运用于景文高速高岭头水库特大桥 Z1、Z2主塔下横梁施工，解决了在高塔环境、不宜设置落地支架情况下下横梁和0号块悬臂段浇筑施工难题。实际施工工期40天，较测算工期减少了5天，有效提高了施工进度。实际施工费用约120万元，较测算费用减少约20万元。较落地支架、劲性膺架相比，取得了显著的经济效益。

七、总结

通过工程案例的成功运用，本工艺具有结构简单、协同受力、结构稳定、安全性能高等优点，适用于高塔高空、空间受限环境下的下横梁及0号块悬臂段的施工，可为类似项目提供借鉴与参考。

参考文献

- [1] 董高钟, 翁杨, 俞君楷. 双塔双索面钢混组合梁斜拉桥塔梁临时固结体系研究 [J]. 中国水运, 2024(8):142-144.
- [2] 韩涛. 桥梁挂篮施工技术要点研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024(002):000.
- [3] 赵满. 矮塔斜拉桥主梁0#块支架与临时固结设计与应用 [J]. 价值工程, 2023, 42(35):62-65.
- [4] 刘镇. 连续梁挂篮施工关键技术及控制研究 [J]. 工程技术研究, 2019.DOI: CNKI:SUN:YJCO.O.2019-07-028.