

方钢两种材料焊接而成三角桁架，沿纵桥向间距依次为：3×0.3+8×0.9+3×0.3m。底部支架待中横梁顶部横隔板施工完后再拆除，即23节段施工完成。

主塔中横梁顶部采用托架进行施工，托架由“预埋爬锥+牛腿托架+工字钢纵梁+分配梁”组成。爬锥预埋于中塔柱内壁及中隔板两侧；横梁两侧支架体系为15mm竹胶板+方木+I10工字钢+I18工字钢+I45工字钢，横梁中间部位支架体系为15mm竹胶板+方木+I10工字钢+I22工字钢+I45工字钢，在已浇筑主塔布置牛腿及爬锥预埋件作为模板施工支架的支点。（见图1.1）

2.2 施工重难点分析

（1）结构形式复杂，施工难度大

主塔中横梁结构形式较为复杂、形状极其不规则，各部位尺寸均有渐变，且存在多处预留洞室，无法利用爬模整体爬升，施工过程中需要进行塔柱内侧模板及爬架的拆除，施工中工序转接较为繁杂，对施工工期影响较大。

（2）托架安拆难度大，作业风险较高

主塔中横梁采用托架进行施工，托架整体通过预埋锚栓与主塔连接，施工过程中对预留预埋精度及质量控制要求较高；连接段托架各构件自重较大，安拆过程均须逐件安装、拆除，涉及大量吊装作业，作业风险较高。

（3）高空作业，施工风险较大

主塔中横梁作业面距承台顶面高达115至133米，所有作业均属于高空作业。托架安装与拆除、钢筋工程、模板工程及混凝土工程施工风险极高，对安全要求较为严格。

3 支架有限元分析计算

采用有限元软件对横梁支架进行分析计算，对支架的强度、刚度及稳定性进行计算。根据钢结构设计标准，支架结构采用以概率理论为基础的极限状态设计方法计算。

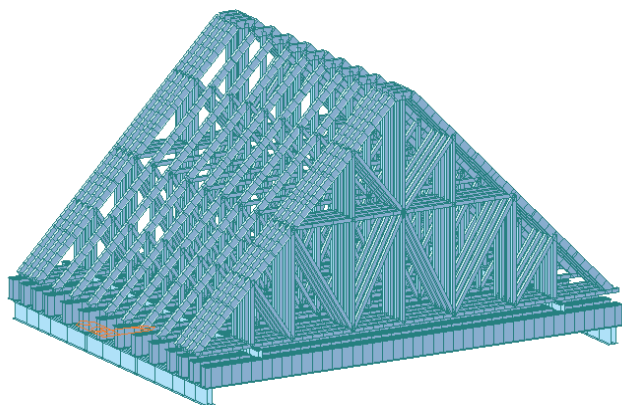


图3.1 主塔中横梁支架有限元模型

3.1 荷载工况定义及组合

因底部支架待中横梁顶部横隔板施工完后再拆除，即23

节段施工完成。作用在横梁支架上的荷载有支架体自重G1、横梁自重G2、施工22号节段时主塔对三角支架的侧压力G3、模板荷载G4、施工人员及机具荷载F1以及风荷载F2。

横梁自重G2根据横梁截面形式进行计算，混凝土容重取26kN/m³，在主塔施工22节段时，主塔对三角支架具有侧压力G3，经力学分解， $G_3 = G \tan 90^\circ \sin 37^\circ$ 。

强度组合： $1.3 \times (G_1 + G_2 + G_3) + 1.5 \times (F_1 + F_2)$

刚度组合： $1.0 \times (G_1 + G_2 + G_3) + 1.0 \times (F_1 + F_2)$

根据施工节段不同，计算分两工况：

工况一：施工22号节段， $G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + F_1 + F_2$ ；

工况二：施工23号节段， $G_1 + G_2 + G_4 + F_1 + F_2$ ；

3.2 工况一支架计算结果

（1）三角托架I20工字钢最大应力为 $133.0 \text{ MPa} < [\sigma_w] = 215 \text{ MPa}$ ，最大剪应力 $32.5 \text{ MPa} < [\sigma_v] = 125.0 \text{ MPa}$ ，相对节点最大变形量为 $0.4 \text{ mm} < [f] = L/400 = 1185/400 = 2.8 \text{ mm}$ ，满足要求。

（2）三角托架方钢最大应力为 $145.8 \text{ MPa} < [\sigma_w] = 215 \text{ MPa}$ ，最大剪应力 $5.3 \text{ MPa} < [\sigma_v] = 125.0 \text{ MPa}$ ，满足要求。但部分杆件长细比不满足规范要求，应在每片桁架间节点增设支撑，以确保长细比满足规范要求。

（3）双拼I20工字钢最大应力为 $142.3 \text{ MPa} < [\sigma_w] = 215 \text{ MPa}$ ，最大剪应力 $89.1 \text{ MPa} < [\sigma_v] = 125.0 \text{ MPa}$ ，相对节点最大变形量为 $0.3 \text{ mm} < [f] = L/400 = 900/400 = 2.25 \text{ mm}$ ，满足要求。

（4）双拼I63工字钢最大应力为 $116.2 \text{ MPa} < [\sigma_w] = 215 \text{ MPa}$ ，最大剪应力 $23.7 \text{ MPa} < [\sigma_v] = 125.0 \text{ MPa}$ ，最大变形量为 $23.9 \text{ mm} < [f] = L/400 = 12800/400 = 32 \text{ mm}$ ，满足要求。

（5）双拼I45工字钢最大应力为 $89.1 \text{ MPa} < [\sigma_w] = 215 \text{ MPa}$ ，最大剪应力 $54.4 \text{ MPa} < [\sigma_v] = 125.0 \text{ MPa}$ ，最大变形量为 $0.9 \text{ mm} < [f] = L/400 = 2700/400 = 6.7 \text{ mm}$ ，满足要求。

3.3 工况二支架计算结果

（1）三角托架I20工字钢最大应力为 $158.8 \text{ MPa} < [\sigma_w] = 215 \text{ MPa}$ ，最大剪应力 $39.5 \text{ MPa} < [\sigma_v] = 125.0 \text{ MPa}$ ，相对节点最大变形量为 $0.6 \text{ mm} < [f] = L/400 = 185/400 = 4.6 \text{ mm}$ ，满足要求。

（2）三角托架方钢最大应力为 $171.0 \text{ MPa} < [\sigma_w] = 215 \text{ MPa}$ ，最大剪应力 $6.3 \text{ MPa} < [\sigma_v] = 125.0 \text{ MPa}$ ，满足要求。但部分杆件长细比不满足规范要求，应在每片桁架间节点增设支撑，以确保长

细比满足规范要求。

(3) 双拼 I 20 工字钢最大应力为 $132.9 \text{ MPa} < [\sigma_w] = 215 \text{ MPa}$, 最大剪应力 $91.4 \text{ MPa} < [\sigma_v] = 125.0 \text{ MPa}$, 相对节点最大变形量为 $0.5 \text{ mm} < [f] = L/400 = 900/400 = 2.25 \text{ mm}$, 满足要求。

(4) 双拼 I 63 工字钢最大应力为 $129.5 \text{ MPa} < [\sigma_w] = 215 \text{ MPa}$, 最大剪应力 $26.8 \text{ MPa} < [\sigma_v] = 125.0 \text{ MPa}$, 最大变形量为 $27.1 \text{ mm} < [f] = L/400 = 12800/400 = 32 \text{ mm}$, 满足要求。

(5) 双拼 I 45 工字钢最大应力为 $82.5 \text{ MPa} < [\sigma_w] = 215 \text{ MPa}$, 最大剪应力 $64.2 \text{ MPa} < [\sigma_v] = 125.0 \text{ MPa}$, 最大变形量为 $0.6 \text{ mm} < [f] = L/400 = 2700/400 = 6.7 \text{ mm}$, 满足要求。

4 中横梁施工关键技术

4.1 预埋件安装

中塔柱连接段托架由“牛腿托架+工字钢+三角桁架”组成, 支架系统采用砂箱作为卸落装置, 设置在牛腿支点顶。通过在中塔中20节内壁预埋爬锥作为支架支点锚固系统, 利用爬锥固定牛腿作为支架支点, 牛腿上设置顺桥向分配梁。塔柱混凝土浇筑时预埋件下方必须仔细振捣, 确保混凝土密实并与预埋板之间结合紧密, 无缝隙。

两侧主塔节段上预埋件主要有施工平台、爬锥等预埋件, 混凝土浇筑前必须核对清楚位置、标高和数量, 确保定位精准且不要有遗漏。

预埋件主要由埋件板、高强螺杆、受力螺栓、爬锥组成。主塔外模预埋件的横向位置由架体布置位置(即导轨)决定, 竖向位置为混凝土浇筑节段顶口向下1000mm处, 当与相关结构件妨碍时, 需适当进行位置调整。

4.2 模板安装

两侧塔柱节段外侧采用原塔柱液压自爬模系统, 主塔中横梁三角区侧模外侧模板(包括进入孔侧模及内腔室侧模)采用木模, 其面板为 $\delta = 21 \text{ mm}$ 胶合板, 面板的背面设置方木, 间距 $250 \text{ mm} \sim 300 \text{ mm}$, 方木与 I20 工字钢三角桁架连接形成整体。内模(包括进入孔底模及内腔室顶板底模)采用木模, 整个底模由钢管支架支撑在横梁底板上, 支架顶面设置方木, 间距 30 cm ; 方木上铺设 $\delta = 15 \text{ mm}$ 竹胶板作为顶板内模。塔柱南北面外侧模板采用爬升方式安装到位。

4.3 模板拆除

主塔连接段内模应从中间往两侧拆除, 先将内模支撑

拆除, 然后将内模竹胶板逐块撬开, 拆除内模, 拆除完毕后, 内模板通过预留人孔由人工逐块运出。托架拆除应严格遵循“先支后拆、后支先拆, 至上而下、由两侧至中间”的原则逐步拆除, 切不可一次性解除全部约束。托架总体拆除顺序应为: 模板分配梁→三角桁架→纵向分配梁→横向主梁→纵向主梁→牛腿托架。须拆除的目标构件应提前与吊装设备连接, 确定解除全部约束后, 方可起吊拆除并运送至安全位置。

5 结语

本文以巢马城际铁路副汉航道桥主塔中横梁为研究对象, 结合其结构特点, 通过参考其他类似桥梁施工经验, 中横梁底部三角部位采用三角托架进行施工, 三角托架由“预埋爬锥+牛腿托架+工字钢横纵梁+三角桁架+分配梁”组成; 顶部采用托架进行施工, 托架由“预埋爬锥+牛腿托架+工字钢纵梁+分配梁”组成, 对支架整体结构进行有限元分析计算, 要求每片桁架间节点增设支撑, 以确保长细比满足规范要求。目前, 主塔已完成合龙, 可为类似桥梁提供参考。

参考文献:

- [1] 周前忠, 王令侠. 商合杭铁路芜湖长江公铁大桥桥塔上横梁施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(3): 11-16.
- [2] 胡雄伟. 重庆寸滩长江大桥桥塔横梁支架设计与施工[J]. 世界桥梁, 2015, 43(2): 40-44.
- [3] 刘鸽, 江晓阳, 彭鹏, 贺希英, 付文宣等. 龙潭长江大桥南塔上横梁支架设计与施工[J]. 施工技术, 2023, 52(18): 90-94.
- [4] 伍艺. 重庆寸滩长江大桥桥塔横梁施工技术[J]. 世界桥梁, 2017, 45(5): 1-5.
- [5] 徐洪华, 王爱溪, 马存骥等. 海华大桥主塔施工关键技术[J]. 施工技术, 2018, 47(11): 135-140.
- [6] 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.
- [7] 张春新, 张晶, 胡海波. 武汉青山长江公路大桥北塔施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2019, 49(2): 1-6.
- [8] 雷栋, 刘健, 张敏. 舟岱跨海大桥索塔上横梁快速施工技术[J]. 施工技术, 2020, 49(15): 41-43.

作者简介:

黄奶清(1982-), 男, 福建福安人, 硕士, 高级工程师, 主研究方向为桥梁设计与施工管理。