

# “H型”索塔上横梁支撑体系稳定性及施工技术研究

杨镇

中铁十六局集团第一工程有限公司

DOI:10.12238/bd.v9i4.4409

**[摘要]** 针对斜拉桥索塔上横梁支撑结构体系施工技术,结合贵港苏湾大桥“H型”索塔施工工况,基于Midas/Civil通用结构计算有限元软件建立“H型”索塔上横梁施工支撑体系三维数值分析模型,对支撑体系各构件受力情况和整体稳定性进行深入分析,对上横梁支撑体系施工技术进行研究。结果表明,该类型支撑结构体系受力情况较好、整体稳定性较高,满足工程施工要求;对支撑体系进行结构设计、计算及现场施工技术分析,确保上横梁施工技术安全可靠,总结相关施工经验,为同类型项目施工提供依据和指导。

**[关键词]** 桥梁工程; 斜拉桥; 索塔上横梁; 临时支撑结构; 施工技术; 数值分析

**中图分类号:** U448.29 **文献标识码:** A

## Study on the Stability and Construction Technology of the Upper Beam Support System of the "H-type" Cable Tower

Zhen Yang

China Railway 16th Bureau Group First Engineering Co. Ltd.

**[Abstract]** Regarding the construction technology of the crossbeam support structure system on the cable-stayed bridge tower, combined with the construction conditions of the "H-shaped" cable tower of Guigang Suwan Bridge, a three-dimensional numerical analysis model of the "H-shaped" cable tower crossbeam construction support system is established based on Midas/Civil universal structural calculation finite element software. The stress situation and overall stability of each component of the support system are analyzed in depth, and the construction technology of the upper crossbeam support system is studied; The results indicate that this type of supporting structure system has good stress conditions and overall stability, meeting the requirements of engineering construction; Conduct structural design, calculation, and on-site construction technology analysis on the supporting system to ensure the safety and reliability of the upper crossbeam construction technology, summarize relevant construction experience, and provide basis and guidance for the construction of similar projects.

**[Key words]** bridge engineering; cable-stayed bridge; cross beam on pylon; temporary supporting structure; construction technology; numerical analysis

### 引言

在桥梁工程建设中,斜拉桥与悬索桥索塔施工一直具有较高的技术难度,特别针对索塔塔柱之间的横梁施工技术,也是工程建设中始终关注的重点内容。尽管我国桥梁建设技术有了突飞猛进的发展,但是对于需要解决的具体问题还有较大的差距<sup>[1-3]</sup>。

“H型”索塔整体结构简单,整体稳定性较好,是很多大跨度斜拉桥和悬索桥设计首选,两座塔柱之间距离较大,上下横梁断面和跨度较大,特别是上横梁不仅跨度大,而且高度高,多采用预埋钢节点+牛腿托架方法施工<sup>[4-5]</sup>;近些年桥梁建设,对上横梁

的施工多采用高空托架形式,该项技术中结构体系设计简单、力学特征明显、结构传力路径合理,现场施工易于操作,被广大工程技术人员所采用<sup>[6-7]</sup>。

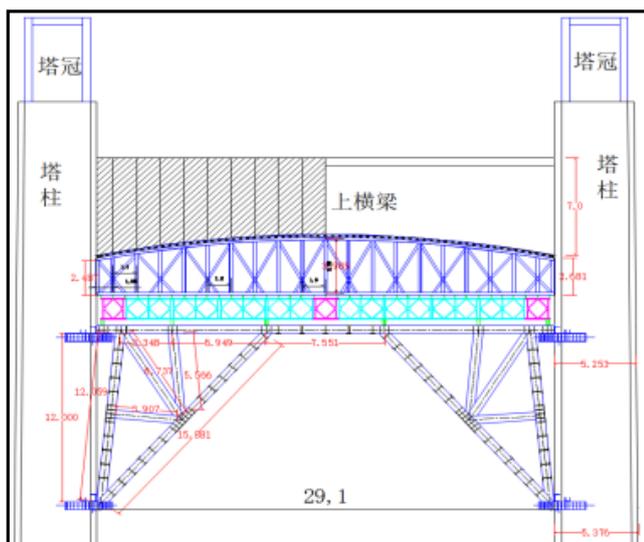
基于同类型桥梁索塔上横梁施工经验,对贵港苏湾大桥索塔上横梁支撑体系的施工进行深入分析,结合有限元计算软件,对支撑结构体系进行参数化整体建模,计算分析支撑结构各构件受力情况及整体稳定性情况,预判结构施工过程受力薄弱点,对施工过程中关键要点和技术进行控制,总结形成关键技术成果,指导现场施工,确保施工安全。

## 1 工程概况

贵港苏湾大桥为钢-混组合结构斜拉桥,桥梁跨越郁江,主跨长为334m。斜拉桥主塔为“H型”预应力钢筋混凝土结构,塔柱总高度为111m,设有上下2处横梁;上横梁位于塔柱顶端,为变高梁单箱单室顶板带挑壁断面,梁跨中高为5.5m,与塔柱交接处梁高为7.0m,净跨为29.1m;顶板含翼缘宽6.6m,底板宽5.8m,顶板、底板、腹板厚均为0.6m。

## 2 上横梁施工支撑体系结构设计方案

上横梁施工临时支撑采用牛腿托架+贝雷梁+钢拱架结构体系,牛腿托架作为主要受力体系固定于两塔柱之间,采用预埋型钢节点连接。牛腿托架中各构件均采用I56a工字钢双拼焊接,共设计3榀、间距为3m,每榀托架之间采用I20a工字钢作为横向连接;贝雷梁与牛腿托架之间采用双拼I56a工字钢分配梁连接,共设置6组贝雷梁,分配梁设置在贝雷梁和牛腿托架节点处;贝雷梁上部设置I20a工字钢型钢拱架,共设置15榀钢拱架;埋入式型钢节点采用I56a工字钢加工制作而成,共设置12组;上横梁临时支撑结构设计如图1所示。



a. 正立面

图1 支撑体系设计示意图(单位: m)

## 3 上横梁施工支撑体系承载力稳定性计算

### 3.1 材料力学参数

该上横梁支撑体系为钢结构,牛腿托架、平联、预埋节点及主分配梁为I56a工字钢,贝雷梁为“321型”军用分配梁,型钢拱架与下部分配梁为I20a工字钢,横联及加固材料为50mm×50mm等肢角钢。

### 3.2 荷载效应组合

#### 3.2.1 恒荷载

①型钢梁支架自重荷载;

②混凝土自重(按26kN/m<sup>3</sup>计)+模板自重(以主梁砼自重的

5%计)。

#### 3.2.2 可变荷载

①施工荷载。根据参考文献<sup>[8]</sup>中要求,施工荷载取2.69kN/m作用于钢拱架上。

②风荷载。根据参考文献<sup>[9]</sup>中要求,按公式(1)进行计算

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1)$$

取风压标准值为0.25kN/m<sup>2</sup>。则风荷载设计值为

$$0.25 \text{ kN/m}^2 \times 0.56 \text{ m} = 0.14 \text{ kN/m} \quad (2)$$

以线荷载施加在钢拱架与托架上。同理,由于贝雷梁内部构件不一,取0.01~0.03kN/m以线荷载施加在贝雷梁上。

#### 3.2.3 荷载效应组合(按照承载能力极限状态)

$$1.3 \times \Sigma \text{恒荷载} + 1.5 \times \Sigma \text{可变荷载} \quad (3)$$

### 3.3 建立有限元数值计算模型

#### 3.3.1 建立临时支撑结构整体数值模型

根据荷载及结构截面参数,结合设计图纸,采用Midas/civil有限元计算软件建立上横梁临时支撑结构体系三维数值分析模型,利用梁单元模拟型钢梁及柱杆件,杆件结点处按刚接处理<sup>[10~11]</sup>。钢拱架与I20a工字钢分配梁间设置为弹性连接,贝雷梁与I20a工字钢分配梁间设置为弹性连接,贝雷梁与I56a双拼工字钢间设置弹性连接,I56a双拼工字钢与托架间设置弹性连接,托架与型钢节点间设置弹性连接,型钢节点与主塔外侧间设置限制线位移的连接,型钢节点与主塔内侧设置刚性连接;在牛腿托架与型钢节点处设置多自由度刚性约束,支撑结构自重由系统自动载入,钢拱架上荷载以单元荷载形式施加在每榀钢拱架上<sup>[11]</sup>;装配式支撑架有限元数值模型如图2所示。

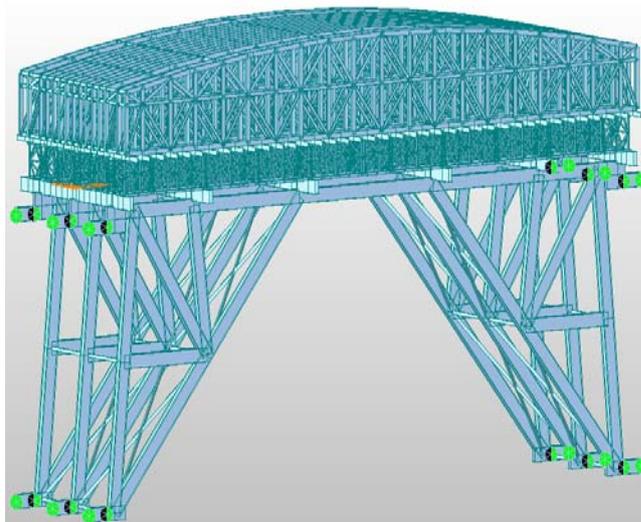


图2 支撑结构有限元数值模型

#### 3.3.2 建立索塔塔柱三维实体数值模型

根据上横梁支撑结构体系预埋型钢节点集合位置和截面参数,利用有限元软件建立索塔塔柱模型,塔柱根部设置6自

由度刚性约束,塔柱顶端为自由端,通过有限元软件导出牛腿托架在对应位置的3个方向支座反力作为节点荷载施加在对应节点上。

### 3.4数值计算结果分析

#### 3.4.1上横梁支撑体系刚度计算结果分析

按照最不利工况进行支撑结构体系的刚度验算,提取最不利工况下荷载组合作用下结构整体应变云图,如图3所示;分别提取各部位结构竖向挠度值,如表1所示。

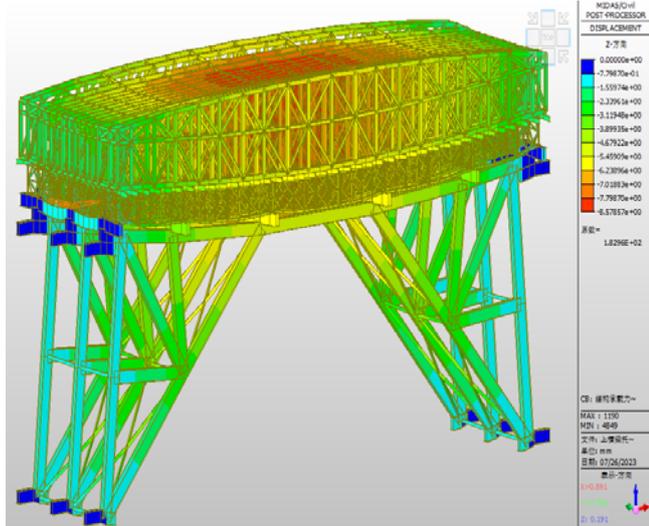


图3 结构整体变形云图(单位: mm)

分析图3结构整体应变云图数值可知,上横梁施工支撑体系结构在荷载作用,整体竖向挠度最大值可达8.58mm,该挠度值是由最下层牛腿托架结构至最上层型钢拱架结构中每层结构弹性变形值叠加累计结果,可为梁底模板抛高值提供参考依据。

表1 结构竖向挠度计算结果

编号	结构名称	计算值/mm	容许值/mm	结论
1	钢拱架	0.04	1.99	满足
2	I20a 工字钢	0.01	2.25	满足
3	贝雷梁	1.86	18.53	满足
4	I56a 工字钢	0.36	7.5	满足
5	牛腿托架	4.85	18.53	满足
6	型钢节点	1.46	5	满足

分析表1中数据可知,支撑体系各层结构竖向变形均满足刚度要求,其中变形最大结构为牛腿托架,其最大值为4.85mm,为容许变形值的26%。

#### 3.4.2上横梁支撑体系强度计算结果分析

按照最不利工况对支撑结构体系进行强度验算,提取最不利工况下荷载组合效应时结构整体应力云图,如图4所示;结构应力值如表2所示。

分析图5中应力云图数值可知,上横梁施工支撑体系结构在荷载作用,结构整体组合应力值最大值可达275N/mm<sup>2</sup>,该最大组

合应力值是由贝雷梁局部受力所导致的应力集中现象;提取每层结构应力云图结果可知,I20a和I56a工字钢分配梁也存在应力集中现象,应力值趋近于容许应力值,该计算结果可为结构优化和加固提供参考依据。

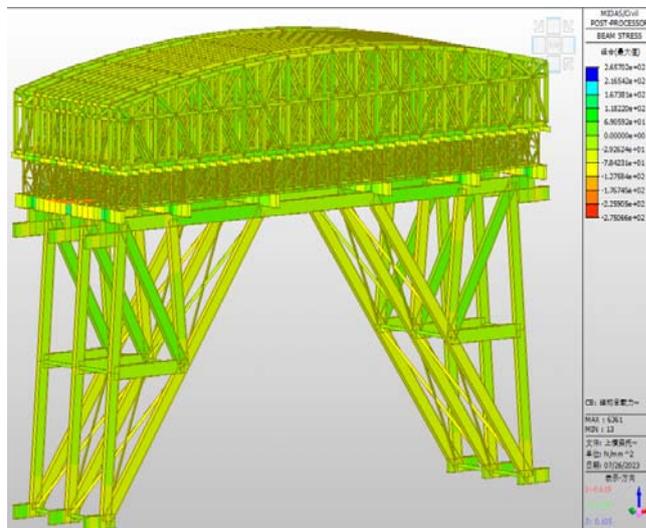


图4 结构体系整体应力云图(单位: N/mm<sup>2</sup>)

表2 结构强度计算结果

编号	结构名称	计算值/(N/mm <sup>2</sup> )	容许值/(N/mm <sup>2</sup> )	结论
1	钢拱架	131	215	满足
2	I20a 工字钢	202	215	满足
3	贝雷梁	275	310	满足
4	I56a 工字钢	202	215	满足
5	牛腿托架	73.83	215	满足
6	型钢节点	122.52	215	满足

分析表2中数据可知,支撑体系各层结构应力极值均满足强度要求,其中应力最大结构为贝雷梁,其最大值为275N/mm<sup>2</sup>,为容许变形值的89%。

#### 3.4.3索塔塔柱承载力计算

根据上横梁支撑体系结构受力计算结果,提取每个节点3个方向支座反力值,按照反向施加到对应的有限元数值模型单元节点上。

节点荷载与边界条件施加完成后,进行后处理程序进行有限元数值分析,根据计算结果,提取索塔应力计算结果和塔柱整体应变云图,如图5所示。

分析索塔应力计算结果可知,支撑体系与索塔连接预埋件处的局部最大拉应力为 $\sigma_y = 1.26\text{MPa} < 1.89\text{MPa}$ ,最大压应力为 $\sigma_z = 5.73\text{MPa} < 23.1\text{MPa}$ ,均满足混凝土抗拉和抗压强度设计值。分析图5中塔柱应变数值云图可知,在荷载组合效应下,牛腿托架对主塔产生的水平推力为1146.3kN,主塔最大侧向位移为2.37mm,满足刚度要求,无需进行特殊处理。

## 4 大型装配式支撑体系施工技术

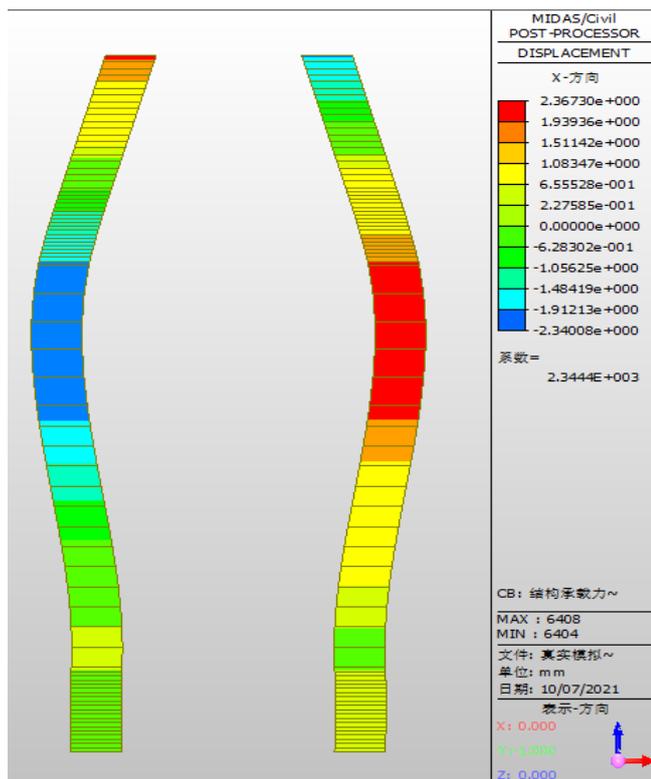


图5 塔柱整体变形云图(单位: mm)

#### 4.1 预埋型钢节点安装

托架与索塔塔柱之间连接采用双肢I56a工字钢预埋作为连接节点, 双肢工字钢上下翼缘采用通长焊缝焊接, 该连接节点需根据设计尺寸和位置与索塔施工同步埋设, 型钢节点埋入端和外露端必须整体下料, 两侧腹板及上下翼缘板之间塞焊加劲肋。

型钢节点在地面加工完成后, 严格按照设计标高和坐标吊装, 安装时预埋节点位置精确定位后与劲性骨架采取可靠连接, 以确保预埋节点不被扰动, 主塔内钢筋和预应力安装时与预埋节点产生冲突需提前调整, 若有较大程度调整的须与设计及时沟通。

#### 4.2 牛腿托架安装

牛腿托架采用I56a工字钢, 以每个三角桁架结构为单元在加工厂根据构件尺寸进行下料加工并组拼, 每榀托架均为双肢工字钢。

现场采用塔吊吊装, 吊装时将单榀托架分解成2片尺寸为 $12\text{m} \times 11\text{m}$ 三角桁架, 吊点设在托架上横梁的两个节点位置, 间距为 $9.3\text{m}$ , 吊点处钢丝绳的夹角须大于 $45^\circ$ , 确保三角桁架垂直吊装过程受力合理。单榀三角桁架吊装与预埋型钢节点进行焊接牢固后, 将同一立面位置的2榀三角桁架之间横梁对顶焊接, 再根据设计要求将桁架之间进行横联。

#### 4.3 贝雷梁

托架上共设计6组贝雷梁, 每组贝雷梁总长为 $28.5\text{m}$ 、宽度为

$0.9\text{m}$ , 每组贝雷梁总重量约为 $5.8\text{t}$ , 塔吊的最大起重重量约为 $6.5\text{t}$ , 贝雷梁在地面上组拼完成后进行吊装, 贝雷梁之间采用横向连接加固, 贝雷梁受力作用点必须为连接节点, 作用点应与分配梁相对应, 每组贝雷梁与每道分配梁之间采用 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 等肢角钢加工制作成限位器固定<sup>[12]</sup>。

#### 4.4 型钢拱架

型钢拱架采用I20a工字钢加工而成, 拱架弧度根据上横梁下腹板线性确定, 拱架中间高度约为 $4\text{m}$ 、两端高度约为 $2.5\text{m}$ , 共设置15榀, 吊装时每3榀为一组, 每组重量控制在 $5.5\text{t}$ 以内; 钢拱架吊装完成后将每组进行平联加固, 下弦杆与分配梁之间采用U型卡扣进行有效连接。

### 5 结论

针对贵港苏湾大桥索塔上横梁支撑结构体系的设计、承载力稳定性验算以及现场施工, 结合以往研究成果进行深入而系统的研究, 具体结论如下:

(1) 该类型上横梁施工托架支撑体系设计思路清晰, 结构受力及传力路径明确, 结构体系整体稳定性较强, 根据受力计算结果可以有效地找到结构受力薄弱点, 并进行优化处理。

(2) 两端的两层分配梁存在应力集中现象, 采用双拼工字钢时承载力为 $203\text{MPa}$ , 趋于临界状态, 因此, 将分配梁由双肢工字钢加强为三肢工字钢; 结构体系竖向挠度值为 $8.6\text{mm}$ , 其中牛腿托架结构竖向变形量最大, 为 $4.85\text{mm}$ , 考虑支撑结构的塑性变形, 在铺设模板时需设定抛高值为 $10\text{mm}$ 左右。

(3) 根据托架支撑体系施工技术分析和现场实际施工情况可知, 该类型支撑体系施工难度小、安全性高、适用性强, 高空拼装焊接工作量少, 施工周期短, 材料消耗率低、可周转利用率高, 社会效益和经济效益明显, 为同类工程提供施工借鉴依据。

#### [基金项目]

中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目(22-C16)。

#### [参考文献]

- [1] 刘方华. 高塔横梁“托架+装配式桁架+盘扣支架”组合支架体系设计及施工技术[J]. 公路, 2021, 66(08): 226-230.
- [2] 彭志川. 悬索桥索塔上横梁施工技术研究[J]. 公路, 2021, 66(02): 143-151.
- [3] 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(03): 11-16.
- [4] 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(05): 37-40, 63.
- [5] 荀其迅. 矮塔斜拉桥索塔临时主动横撑设计与受力分析[J]. 铁道建筑技术, 2023(08): 75-78.
- [6] 郭常瑞, 黄晓星, 胡学伟. 马普托大桥索塔上横梁牛腿支架架施工技术研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(S1): 120-124, 131.

[7]王鹏.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[J].中外公路,2020,40(3):124-128.

[8]周水兴,何兆益,邹毅松.路桥施工计算手册[M].北京:人民交通出版社,2010.

[9]建筑结构荷载规范:GB50009-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[10]赵可.装配式贝雷梁受力性能分析及大跨度施工设计[J].钢结构,2018,33(2):84-88.

[11]吴秀峰,韩建林,赵可.宽幅斜拉桥主梁现浇大跨度膺架力学特性分析[J].空间结构,2018,24(2):86-91.

[12]郭志永.复杂场地中跨度30m以上装配式贝雷梁支架施工技术研究[J].钢结构(中英文),2019,34(12):104-107,113.

**作者简介:**

杨镇(1986—),男,山东省枣庄市滕州市人,高工,主要研究方向为工程项目管理及施工技术研究。