

# 悬索桥施工用塔顶门架的优化设计方案

余丹 韦福堂 甘科 罗勉

(柳州欧维姆工程有限公司 柳州 545005)

**摘要:**在悬索桥缆索系统施工中,塔顶门架作为最重要的临时设施之一,对塔顶门架进行优化设计从成本控制方面考虑是非常必要的。文中以贵港市同济大桥为背景进行研究,以技术上成熟、经济上合理为原则,通过改变门架的连接方式、优化柱脚处理等方式,提高门架的利用率,减小损耗率,节约施工成本。

**关键词:**悬索桥 缆索系统施工 塔顶门架 主索鞍吊装 优化设计

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2016.01.005

## 1 引言

近年来,随着桥梁建设的日益发展,悬索桥以其优美的造型,强大的跨越能力在众多的桥型中脱颖而出,得到越来越多的青睐。因而对施工的精细化、成本控制等要求也越来越高。塔顶门架作为缆索系统中最重要的临时设施之一,对整个缆索系统施工起着至关重要的作用。

由于悬索桥主索鞍重量较大,在吊装过程中,单个索鞍吊装重量在20t—45t之间,因此,施工中对塔顶门架承载力的最高要求是满足吊装索鞍需要。起重吊装工程属于危险性较大的分部分项工程,在施工过程中需要编制专项施工方案,必要时还需组织专家对施工方案进行详细评审。而且,塔顶门架用钢量大,对其进行优化设计,提高利用率,对施工单位降低成本是有很大帮助的。针对上述问题,本文以贵港同济桥为例对悬索桥塔顶门架优化设计做一些尝试性探讨,希望对以后对类似结构的设计和施工起到一些参考作用。

## 2 工程概况

贵港同济大桥主桥是双塔三跨混合梁自锚式悬索桥,主桥跨径组成为132m+280m+132m,主跨的跨度长为280m,理论矢跨比为1/5.5;边跨的跨度为132m,边跨矢跨比为0.086;主索鞍重量为36.6t。

## 3 塔顶门架优化设计

### 3.1 优化设计方案

结合现场情况,塔顶门架设计高度为6m,悬

挑长度为4m,宽度3.5m。门架6根立柱及联系杆件规格均为HW200×200×8×12型钢,两片之间采用18b槽钢连接,吊装主索鞍的滑动横梁规格为双拼36a工字钢,上横梁滑动面采用15mm厚钢板+3mm厚不锈钢板结合处理。门架整体使用8.8级M20高强螺栓连接。利用塔吊将杆件吊装至塔顶,在塔顶完成拼装或者在地面完成部分拼装后再用塔吊吊装至塔顶。单个门架重量为12.43t,全桥共4套,总重为49.73t。门架设计图如图1所示:

由于塔顶门架的主要功能是满足吊装主索鞍要求。因此,需先对塔顶门架进行承载能力分析。

### 3.2 方式方法

通常,对于需要吊装主索鞍的塔顶门架杆件间连接方式为销接(如青田中湖桥)或者焊接(如松原天河桥)。关于销接,《钢结构设计规范》中对结构销接计算方式并没有相关规定,只能在由中铁大桥局组织编制的《铁路桥梁钢结构设计规范》中找到三条关于销接的计算规定,而且还不是强制性规定。因此,销接计算存在着计算依据不充分的问题。除此之外,销接结构普遍存在变形过大等现象影响结构整体稳定性。所以,对于起重吊装结构,销接并不是最理想的连接方式。

焊接作为最常用的连接方式,焊接结构存在着结构整体稳定性好,变形小等优点,在各种施工中普遍使用。但是塔顶门架作为临时结构,需

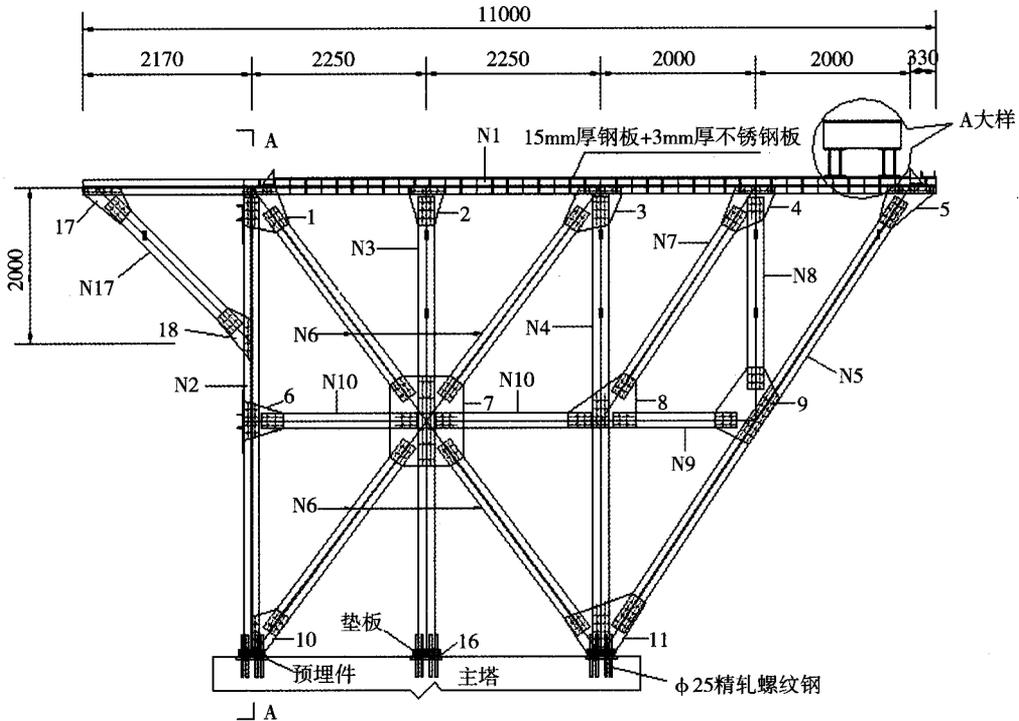


图1 同济大桥塔顶门架侧视图

提高其生产利用率、可再利用次数。而焊接的结构拆除后基本上无法再次利用，造成钢材浪费、成本增加等缺陷。因此，在塔顶门架中，焊接的缺点表现的更加明显，同样不是最理想的连接方式。

高强螺栓连接在钢结构中使用较多，受力明确，计算简单，而且安装、拆卸方便快捷，门架材料可重复利用。因此，从成本控制的角度考虑，螺栓连接是塔顶门架理想的连接方式。

### 3.3 荷载计算

根据《贵港市同济大桥工程施工图设计文件》主索鞍重量为36.6t，由于门架材料是其他项目使用过的，故在计算时乘以折旧系数1.1；由于主索鞍在吊装或者滑移过程中会因风荷载或者其他因素引起晃动，故根据《钢结构设计规范》（GB50017-2003）需考虑动载系数1.2；还需考虑主索鞍质量系数1.05。因此，吊装荷载计算如表1所示：

表1 吊装荷载计算

主索鞍重量(t)	折旧系数	质量系数	动载系数	计算重量(t)
36.6	1.1	1.05	1.2	50.7

### 3.4 有限元模型及边界条件设置

根据设计资料利用桥梁设计软件迈达斯（MIDAS/Civil）建立三维有限元模型，单元类型采用梁单元，模型共计37个节点，划分为56个单元（如图2所示）。各杆件之间使用8.8级M20的高强螺栓连接，使用扭矩扳手拧到设计力矩，每根杆件的端部至少有8个高强螺栓组成螺栓群，可以承受剪力和弯矩，故在模型中各杆件间采用固结处理。6根立柱与塔顶预埋件相连，每个柱脚使用6根 $\phi 25$ 的精轧螺纹钢拉结，并进行张拉。因此，模型中边界条件采用固结来约束柱脚节点的所有自由度。

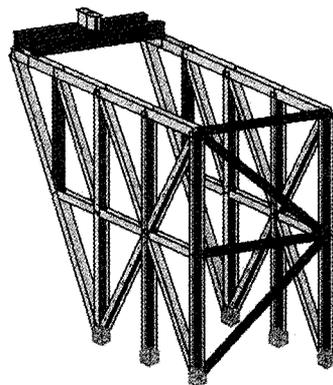
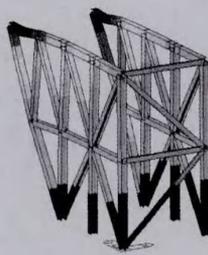


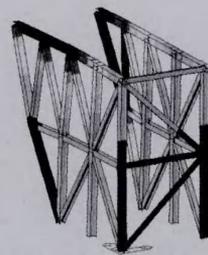
图2 有限元模型

### 3.5 最不利工况计算

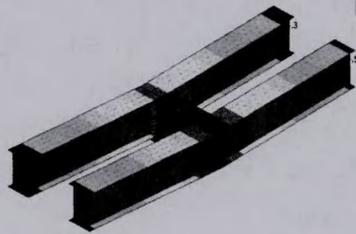
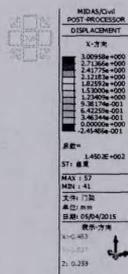
根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2004) 4.3.7条及附录A, 贵港地区10年一遇的风压值为 $0.25\text{kN/m}^2$ 。因此, 将风荷载工况与吊装过程的最不利工况进行组合, 门架受力示意图及计算结果如图3所示:



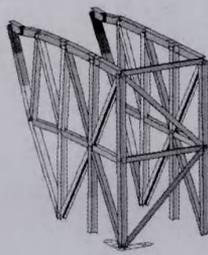
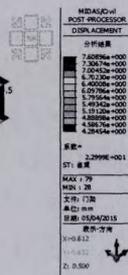
(a) 门架位移图



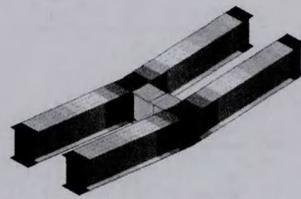
(b) 门架X方向位移图



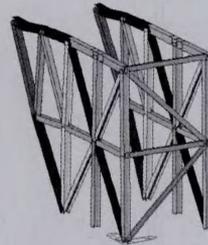
(c) 滑动横梁竖向位移图



(d) 门架应力图



(e) 门架滑动横梁应力图



(f) 门架轴力图



图3 有限元计算结果

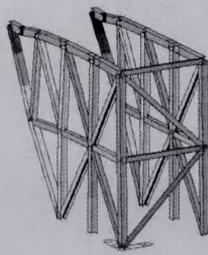
在此组合工况下, 门架最大组合位移为4.5mm, 位于悬臂段最外侧位置, X方向最大位移为3mm; 滑动横梁跨中部位最大相对位移为3.0mm; 门架最大应力为85.7MPa; 滑动横梁最大应力为126MPa; 杆件最大轴压力为29.5t, 位于悬臂段斜撑柱脚位置处; 最大反力为48.9t, 位于最外侧立柱柱脚位置, 后柱脚最大反力为20.1t。

### 3.6 模态分析

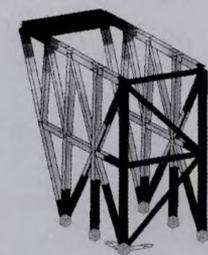
利用桥梁设计软件迈达斯(MIDAS/Civil)对结构进行屈曲分析, 取前5阶模态, 各阶模态的变形图(如图4所示)及所对应的特征值如表2所示:

表2 门架各阶模态特征值

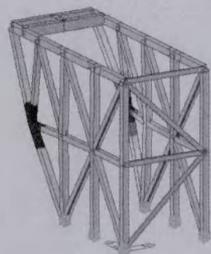
屈曲模态	1	2	3	4	5
特征值	28.03	57.73	60.56	115.79	126.20



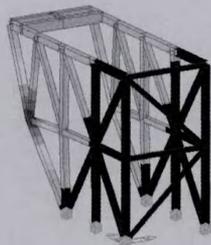
(a) 门架一阶模态下X方向变形图



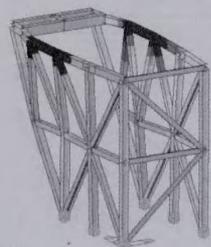
(a) 门架一阶模态下X方向变形图



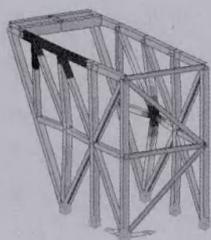
(b) 门架一阶模态下X方向变形图



(c) 门架三阶模态下X方向变形图



(d) 门架四阶模态下X方向变形图



(e) 门架五阶模态下X方向变形图

图4 门架各阶模态下的变形图

### 3.7 柱脚设计

门架柱脚常用的固定方式是和预埋件直接焊接,拆除时候柱脚会被割除一部分,但使用螺栓连接方式的柱脚这样做会导致下次安装时达不到精度要求,造成门架无法顺利安装。同济桥塔顶门架在柱脚焊接一块尺寸为350mm×300mm×30mm的钢板,开6个φ50的圆孔,调节水平方向位置。利用φ25精轧螺纹钢加垫板进行拉结固

定,使用此种方式最大的好处是当预埋件高程精度不足时可在柱脚下加相应厚度的垫板加以消除高程误差。结构如图5、图6所示:

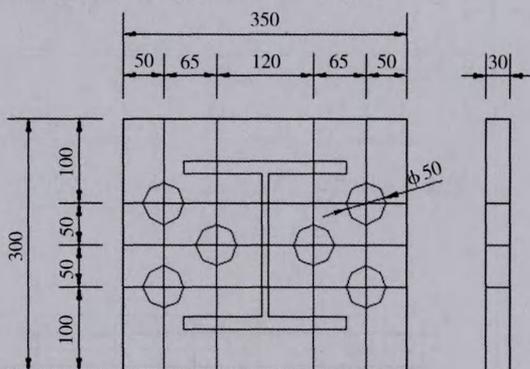


图5 柱脚板尺寸图

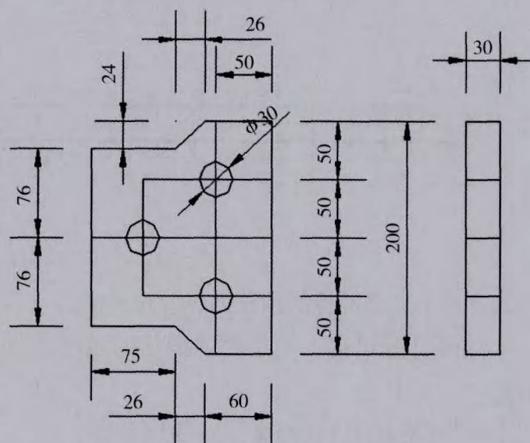


图6 垫板尺寸图

### 3.8 滑动横梁设计

滑动横梁是直接承受吊装荷载的结构,因此往往设计刚度、重量都较大,导致安装、拆卸不便。同济桥塔顶门架滑动横梁两根之间采用连接板将其连接(如图7所示),安装时单根吊装至塔顶,完成安装后可直接拆除。如果主索鞍不是同时到场,全桥滑动横梁加工一套即可满足使用,可节省大量钢材。

### 3.9 高强螺栓验算

根据《钢结构设计规范》(GB50017-2003)7.2.2条规定,在抗剪连接中,每个高强螺栓的承载力设计值应按式计算:

$$N_v^b = 0.9n_f \mu P$$

式中:  $n_f$ —传力摩擦面数目,本例取  $n_f=1$   
 $\mu$ —摩擦面抗滑移系数,本例取0.45

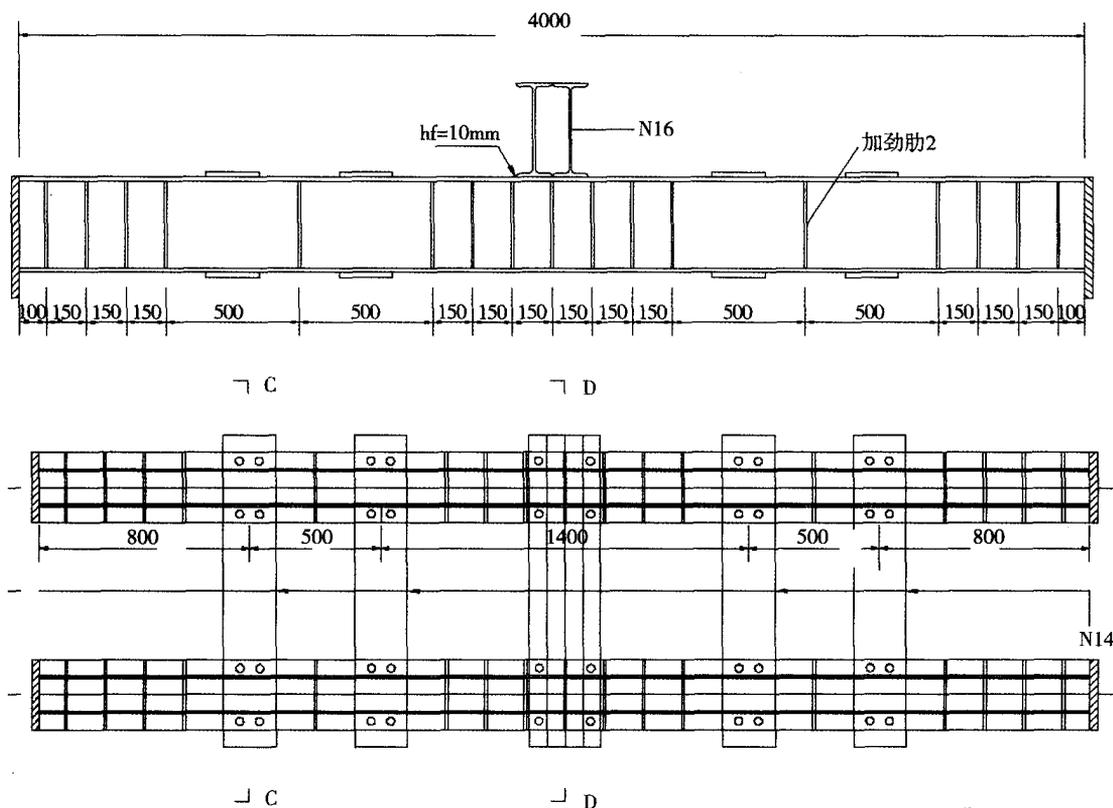


图7 滑动横梁

$P$ —一个高强螺栓的预拉力, 取125kN,  
故经计算可得, 单个高强螺栓的承载力设计值:

$$N_v^b = 0.9 \times 1.0 \times 0.45 \times 125 = 50.625 \text{ kN}$$

通过有限元计算可知, 杆件轴力最大为295 kN, 故需要高强螺栓数目为5.8个, 而在轴力最大位置处所设置的高强螺栓数目为16个, 满足要求。

又由于每根杆件端部所设置的高强螺栓数目最少为8个, 已经满足最大轴力位置处高强螺栓数目的最低要求, 故其他位置处高强螺栓无需验算。

#### 4 结语

塔顶门架作为悬索桥缆索系统施工最重要的临时设施之一, 在设计时必须引起足够的重视。如果设计不当, 不仅会导致钢材浪费严重, 成本增加, 还会影响施工, 延误工期。塔顶门架的设计应该遵循以下原则:

(1) 技术上成熟。在满足吊装要求的情况下, 尽量使用已经成熟的工艺使门架各杆件受力

均匀, 避免出现局部杆件受力过大的情况。单个门架使用6根立柱, 以减小后柱脚拉力, 立柱间使用米字型或菱形连接。

(2) 经济上合理。在满足技术要求的前提下尽量减少一些不必要的临时杆件, 减小钢材的消耗量。杆件间采用可拆卸式联系方式, 增加门架的使用次数, 在多次摊销中降低施工成本。

虽然文中对塔顶门架设计做了一些变更, 可提高利用率, 但是实际施工中仍有诸多问题没有解决, 如:

1) 螺栓连接对预埋件的精度要求非常高, 虽然文中柱脚设计方式可消除高程方向的安装误差, 但是平面方向依然会存在安装误差, 如何提高平面预埋精度需要根据实际情况重点考虑。

2) 当门架较高时, 入鞍葫芦的挂点较高, 导致入鞍不便。施工中通常是通过在门架适当的高度处焊接几根横梁来解决, 但是焊接又会破坏杆件的整体性, 对下次使用造成一定影响。如何减少门架施工中的焊接问题仍需要设计人员深入思考。