



其中各变量为

$$a = a(I, \phi) = \frac{12EI}{L^3(1 + \phi)}$$

$$b = b(I, \phi) = \frac{-12EI}{L^3(1 + \phi)}$$

$$c = c(I, \phi) = \frac{6EI}{L^2(1 + \phi)}$$

$$d = d(I, \phi) = \frac{-6EI}{L^2(1 + \phi)}$$

$$e = e(I, \phi) = \frac{(4 + \phi)EI}{L(1 + \phi)}$$

$$f = f(I, \phi) = \frac{(2 - \phi)EI}{L(1 + \phi)}$$

$$\phi_i = \frac{12EI_i}{GA_i^2 L^2} \quad (i = y, z)$$

式中,  $A$  为梁单元横截面面积,  $E$  为材料杨氏模量,  $L$  为单元长度,  $G$  为材料剪切模量,  $J$  为扭转转动惯量,  $I$  为截面惯性矩,  $A_i$  为沿  $i$  方向的剪切面积。

由单元刚度矩阵可知, 该单元可用于承受拉、压、弯、扭的计算。这种单元在每个节点上有六个自由度:  $x, y, z$  三个方向的线位移和绕  $x, y, z$  三个轴的角位移。可用于计算应力硬化及大变形的有限元问题。通过一个相容切线刚度矩阵的选项来考虑大变形(有限旋转)的分析。利用其计算结果, 可以方便地进行强度及刚度的校核。

## 1.2 屈曲分析理论

结构静力平衡方程为:

$$[K]\{U\} + [K_c]\{U\} = \{P\}$$

式中,  $[K]$  为结构弹性刚度矩阵,  $[K_c]$  为结构几何刚度矩阵,  $\{U\}$  为结构的位移,  $\{P\}$  为作用在结构上的荷载。

结构的几何刚度矩阵由各单元的几何刚度矩阵构成, 各单元的几何刚度矩阵与构件的内力相关。

$$[K_c] = \sum [k_c]$$

$$[k_c] = F[\bar{k}_c]$$

式中,  $[\bar{k}_c]$  为各构件的几何刚度矩阵,  $F$  为构件内力。

将几何刚度矩阵用临界荷载系数与使用初始荷载计算的几何刚度矩阵的乘积表示:

$$[K_c] = \alpha[\bar{K}_c]$$

式中,  $\alpha$  为临界荷载系数,  $[\bar{K}_c]$  为使用失稳分析所用的初始荷载计算的几何刚度矩阵。

$$[K + \lambda K_c]\{u\} = \{p\}$$

$$[K_{eq}] = [K + \lambda K_c]$$

平衡方程失稳的条件是存在奇异解, 即等效刚度矩阵的行列式的值为零。

非稳定的平衡状态:  $|[K_{eq}]| < 0 \quad (\lambda < \lambda_{cr})$

失稳状态:  $|[K_{eq}]| = 0 \quad (\lambda = \lambda_{cr})$

稳定状态:  $|[K_{eq}]| > 0 \quad (\lambda > \lambda_{cr})$

线性屈曲分析就是求解  $|[K + \lambda_i K_c]| = 0$  的特征值, 式中,  $\lambda_i$  为特征值(临界荷载系数), 屈曲分析中的特征值就是临界荷载系数。

## 2 工程概况

该桥塔支架横桥向( $X$ 方向)长 105.6 m, 纵桥向( $Y$ 方向)长 17.9 m, 高( $Z$ 方向)107.2 m(图2)。支架主要由两排平面支架组成, 两平面支架之间设有  $\phi 325 \times 6$  mm 的联系钢管, 以保证两者的整体性, 以提高支架的纵桥向刚度。在支架两侧设置有揽风索, 揽风索为每束 1715.2 的钢绞线, 支架每侧各拉五束, 位置在从左数第 3~7 排钢管桩桩顶。揽风索地面固定点位置距离支架外侧钢管桩约 36 m。

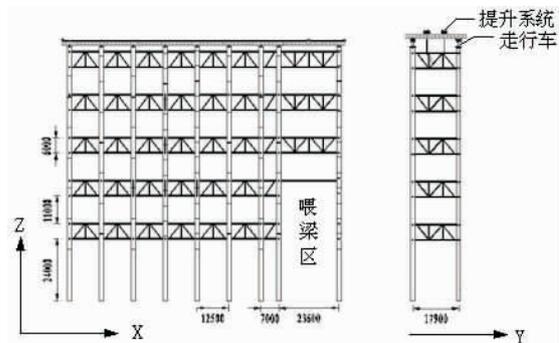


图2 桥塔支架结构示意图

每排平面支架主要由 9 根  $\phi 1520 \times 10$  mm 的钢管柱组成, 钢管柱之间也设有  $\phi 325 \times 6$  mm 的联系钢管。在两平面支架顶部各设置一单层八排的加强型贝雷梁, 再在上部设置一横跨两平面支架的单层六排加强型贝雷梁以放置提升系统。在两层贝雷梁之间设置走行车, 达到提升系统在支架顶部双向自由移动的目的。贝雷梁主要由 20#槽钢, 贝雷梁弦杆和贝雷梁斜杆组成, 其横截面如图 3、图 4 所示。

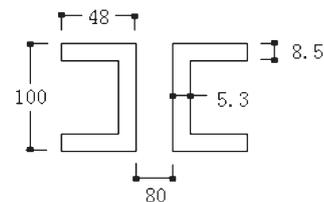


图3 贝雷梁弦杆的横截面

施工期间, 两台 80 t 龙门吊在桥塔支架上进行吊装工作, 共吊装 150 t 重量, 两台龙门吊之间的距离最小为

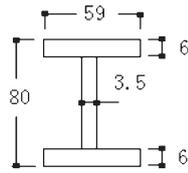


图 4 贝雷梁斜杆的横截面

4 m;门架顶的装吊设备(含小车、卷扬机和贝雷片横梁)重 25.3 t;一龙门吊横梁重 20 t,共 2 根龙门吊横梁。进行静力计算时,考虑 1.4 的动荷载放大系数。由于桥塔建设的施工周期较长,须考虑风载荷的影响。根据实际情况,风载荷按 10 年一遇及 B 类地区考虑。

### 3 有限元模型及荷载

#### 3.1 模型的简化及建立

借助大型有限元分析软件 Midas - Civil 建立该桥塔支架的空间离散模型,支架各构件均采用梁单元模拟,揽风索采用桁架单元模拟<sup>[2-3]</sup>。横跨两直面支架的贝雷梁及其上的提升系统简化为作用在支架上的载荷。计算风载荷影响时,考虑沿支架刚度最小的纵向方向,则只建立一侧的揽风索即可。支架有限元模型如图 5 所示,共划分 24 795 个单元,12 946 个节点。

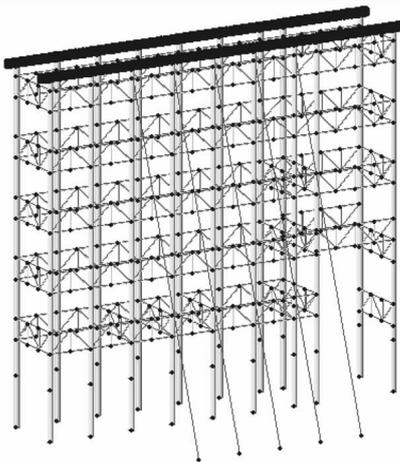


图 5 支架有限元模型

#### 3.2 边界条件及工况

支架钢管柱均插入泥层,直至基岩,所以,可认为钢管柱底部为固结。在施工期间,支架主要受到恒载(支架等自重),吊车活载和风荷载作用。风荷载考虑为静压力作用。施工期间,风荷载根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60 - 2004)4.3.7 条计算<sup>[4]</sup>:

$$F_{wh} = k_0 k_1 k_3 W_d A_{wh}$$

风载按 10 年一遇及 B 类地区考虑。计算风荷载结果见表 1。

表 1 桥塔支架风载

距离水面高度(m)	风压值(MPa)
5	0.000 330
15	0.000 378
20	0.000 414
30	0.000 467
40	0.000 515
50	0.000 549
60	0.000 583
70	0.000 610
80	0.000 646
90	0.000 665
100	0.000 693

风荷载影响较大时停止施工,所以荷载组合方式为:恒载 + 吊车活载,恒载 + 风荷载两种。恒载 + 吊车活载的组合中,对龙门吊在支架上的不同位置进行最不利工况组合,组合成 4 个不利工况,如图 6 所示。恒载 + 风荷载的组合中仅组合一个工况,即自重 + 风载,作为工况五。

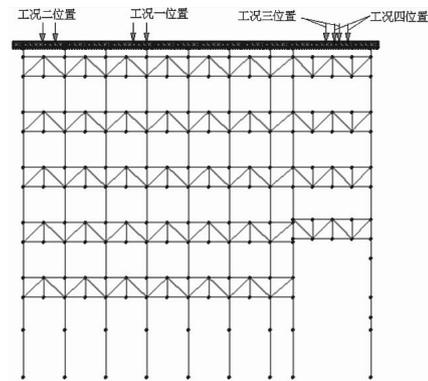


图 6 各工况时龙门吊位置示意图

### 4 计算结果及分析

#### 4.1 位移结果及分析

经计算,各工况下支架在各方向上最大位移值见表 2。由于喂梁区顶部贝雷梁跨度最大,所以,当工龙门吊位于喂梁区中间位置时贝雷梁发生挠度变形较其它区域大,但其数值较小。工况三和工况四时的挠度值分别为 -4.95 cm、-4.87 cm,仅为跨梁区跨度的 1/476 和 1/485。工况三时支架的位移结果如图 7 所示。最大横向位移则发生在工况五,最大值为 32.23 cm,其方向为风荷载作用方向,为支架高度的 1/280。工况五时支架的位移结果如图 8 所示。

表 2 各工况的最大位移值

工况	UX(cm)	UY(cm)	UZ(cm)
工况一	0.17	0.299	-1.7
工况二	0.36	0.32	-2.06
工况三	0.86	0.39	-4.95
工况四	0.89	0.43	-4.87
工况五	1.81	32.23	-1.18

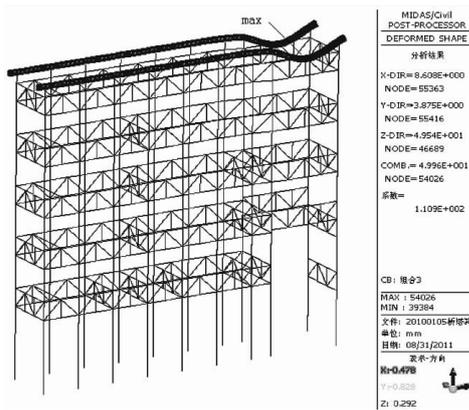


图7 工况三时支架位移结果图

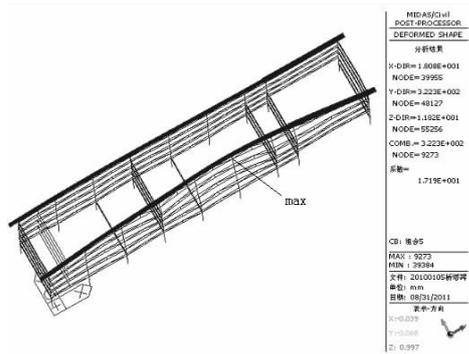


图8 工况五时支架位移结果图

4.2 应力结果及分析

经计算,工况一至工况四,贝雷桁架能很好的将吊车荷载分散到支架顶部较大范围,使得支架的应力分布未出现较大的区域集中现象。钢管桩及联系钢管正应力值较小,最大值均在 100 MPa 以内,说明在正常施工过程中,支架具有足够的强度。贝雷桁架直接与走行车接触,应力分布区域集中现象较为严重,在荷载作用区域出现了较大的应力值。工况五时,由于支架纵桥向刚度较小,钢管桩及联系钢管正应力最大值较其它工况大,分别达到 104.75 MPa 和 123.65 MPa。说明在支架两侧设置揽风索以抵抗纵桥向荷载是很好的设计方法,也是很有必要的。支架各工况下的应力极值见表 3。

表 3 支架各构件应力结果

工况	钢管桩正应力(MPa)	联系钢管正应力(MPa)	贝雷桁架正应力(MPa)	贝雷桁架剪应力(MPa)
工况一	41.06	38.78	156.23	38.01
工况二	36.83	33.9	164.42	72.37
工况三	60.36	83.87	186.23	90.25
工况四	58.09	73.7	188.34	78.63
工况五	104.75	123.65	70.99	39.01

4.3 应力结果及分析

为了分析支架在荷载作用下的稳定性,根据结构所受荷载的数据,计算了支架在各工况下的稳定性。对于

桥塔支架结构,1阶屈曲是其稳定性控制的关键。对支架进行屈曲分析,求得了支架各工况时的第1阶屈曲模态。各工况时的屈曲模态如图9~图13所示,同时得到每个屈曲模态的临界荷载系数,计算结果见表4。

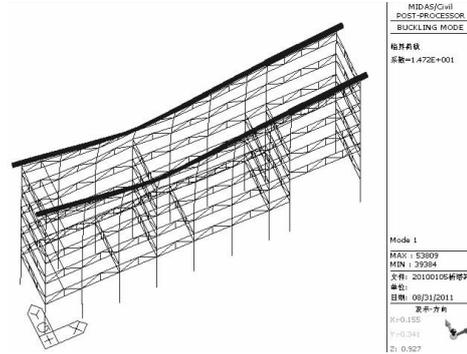


图9 工况一支架的一阶屈曲模态

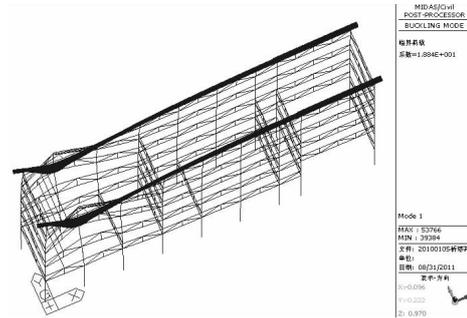


图10 工况二支架的一阶屈曲模态

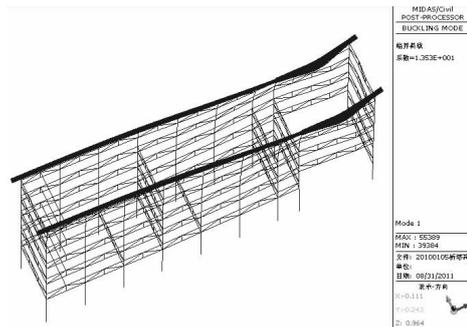


图11 工况三支架的一阶屈曲模态

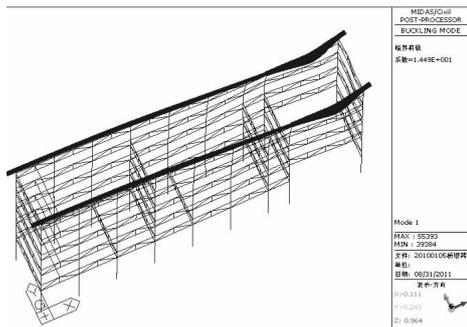


图12 工况四支架的一阶屈曲模态

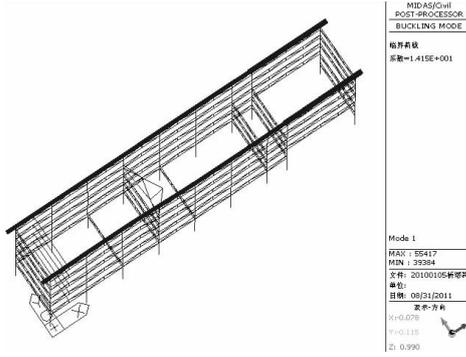


图 13 工况五支架的一阶屈曲模态

表 4 各工况时支架的临界荷载系数

工况	一阶临界荷载系数
1	14.72
2	18.84
3	13.53
4	14.49
5	14.15

由图 9 ~ 图 13 可知,工况一至工况四时,支架的失稳区域跟吊车所在位置密切相关,都呈现出局部失稳的特点。工况五,由于揽风索的影响,支架最先失稳发生在顶部的横向联系杆,为局部失稳。由表 4 可知,该支架具有较高的稳定安全系数,满足稳定性要求<sup>[5-6]</sup>。

### 5 结论

通过以上桥塔支架的结果分析,可得如下结论:

(1) 桥塔支架在正常施工中和风载作用下满足规范规定的强度条件、刚度条件及稳定性条件。

(2) 桥塔支架受纵向荷载作用影响较大,建议施工期间遇风级较大时,及时停止施工,并采取相关措施加强施工支架的整体刚度。

(3) 在桥塔支架此类施工支架,在其两侧设置揽风索,从增强支架结构抵抗抗纵向荷载及经济角度来说,都是非常有利的。

### 参考文献:

[1] Peter Kohnke. Ansys theory Reference[M]. Release 5.7. ansys inc. 1999.  
 [2] 任华,谭毅平.箱梁施工支架的三维静力分析[J].中外公路,2010(2):140-141.  
 [3] 刘华,叶见曙,刘键,等.连续梁桥跨河施工支架研究[J].桥梁建设,2006(1):140-141.  
 [4] JTG D60-2004,公路桥涵设计通用规范[S].  
 [5] GB50017-2003,钢结构设计规范[S].  
 [6] 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,2001.

## Study on Static Load and Stability of a Large Bridge Tower Construction Falsework

DONG Bi-xia<sup>1</sup>, ZHAN Yu-lin<sup>2</sup>, CHEN Yan<sup>3</sup>

- (1. South West Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Company, Chengdu 610021, China;
- 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
- 3. Northwest Research Institute Co., Ltd. of China Railway Engineering Corporation, Gansu 730000, China)

**Abstract:** In this paper, the finite element method is used to study on static load and stability of a large bridge tower construction falsework. On account of the weaker longitudinal stiffness of a bridge tower construction falsework, the influence of longitudinal load is a main focus through the analysis. The results indicate that the components of the construction falsework are safe during the construction process; the deformation of falsework meets the requirements of construction; the stability of the bar and integral of falsework achieve its requirements during the construction process. By setting the wind-resistance cables on both sides of the construction falsework, the problem of weaker longitudinal stiffness can be solved very well.

**Key words:** construction falsework; bridge tower; static load; stability; finite element method