



装饰块,C40 砼主要用于主塔承台,C35 水下砼主要用于承台封底及桩基。承台底桩基嵌固深度采用多单元弹簧的边界条件模拟,桩基在理论嵌固位置固结。承台底部与桩基刚接,塔座与塔柱刚性连接,横撑与塔柱固结。下横梁分层浇筑采用施工阶段联合截面功能模拟,浇筑完成时临时支架对塔支的作用采用等效荷载代替。下横梁支撑作用采用只受压弹性支承模拟,通过定义弹性支承刚度来等效下横梁支架的刚度。

主塔与下横梁交接处采用梁端刚域处理,为防止下横梁与主塔的不均匀下挠产生较大次内力,采用下横梁与下横梁支架分离的方式。由于该桥主塔东西侧结构布置相同,仅选择西侧主塔进行分析计算。结构计算模型见图 3。

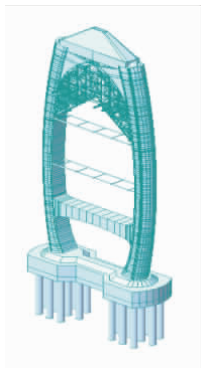


图 3 主塔空间分析有限元模型

3 计算结果分析

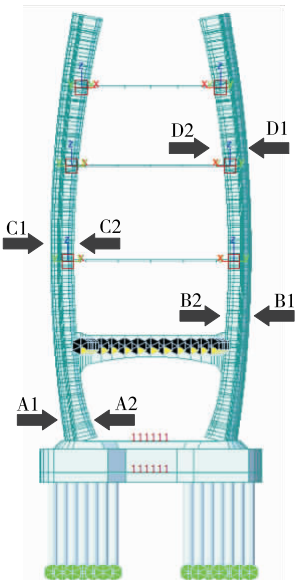
3.1 横撑关键截面应力

主塔及横撑受力分析的验算荷载主要分为结构自重(砼容重取  $26 \text{ kN/m}^3$ )和施工荷载移动荷载两部分,其中自重根据实际重量计算,施工阶段移动荷载考虑人群荷载、爬模系统荷载及施工机具荷载。其他可变荷载包括:1) 温度荷载。温度荷载的取值取决于当地温度变化。2) 风荷载。施工阶段设计基本风速为  $32.1 \text{ m/s}$ ,主塔上的风荷载及施工阶段的风荷载按 JTG/T D60-01-2016《公路桥梁抗风设计规范》的规定计算。3) 收缩徐变。计算时考虑砼徐变对应力的影响,砼的徐变按如下经验数值模型取值:

$$C(t, \tau) C_1 (1 + 9.20 \tau^{-0.45}) [1 - e^{0.30 (t - \tau)}] + C_2 (1 + 1.70 \tau^{-0.45}) [1 - e^{-0.005 (t - \tau)}]$$

式中: $C_1 = 0.23/E_2$ ;  $C_2 = 0.52/E_2$ ;  $E_2$  为砼的最终弹性模量。

根据有限元模型计算和设计分析,将变形和应力最大值处设为关键截面,即承台、横梁、横撑与主塔相交截面处(见图 4)。



A、B、C、D 分别为承台、承台横梁、承台第一道横撑、承台第二道横撑与主塔相交截面。

图 4 设置横撑结构边界条件及关键截面示意图

按 GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》的要求,C50 砼轴心抗压强度设计值  $f_c = 23.1 \text{ MPa}$ ,轴心抗拉强度设计值  $f_t = 1.89 \text{ MPa}$ 。施工至成塔时主塔柱关键截面的压应力最大值  $\sigma_1 = 6.97 \text{ MPa}$ ,拉应力最大值  $\sigma_2 = 1.73 \text{ MPa}$ ,均小于规范值,砼受力满足要求。各截面的应力见表 1。

表 1 设横撑主塔关键截面的应力

关键截面	荷载	阶段	最大应力/MPa	最小应力/MPa
A	合计	主塔完成	0.926 0	-2.55
B	合计	主塔完成	1.730 0	-6.97
C	合计	主塔完成	-0.050 1	-2.93
D	合计	主塔完成	-0.133 0	-3.90

3.2 横撑设置原则及应力计算

在索塔塔柱根部最不利位置即出现最大拉应力处,在拉应力超限前进行第一道主动临时横撑设置,之后进行斜柱后续节段砼浇筑。第一道临时横撑完成后可降低塔柱根部的拉应力,使其恢复到设计范围,后续节段浇筑砼的自重及施工荷载对第一道横撑位置处塔柱砼截面的影响较大,但对塔柱根部的影响较小。在后面节段施工中,若根部拉应力接近控制值,需考虑设置第二道临时横撑,其支撑位置的确定需考虑轴向压应力及附加拉应力的组合应力在

第一道支撑所在截面处是否超限。塔柱根部截面在第一道横撑设置后基本无横桥向附加拉应力,若顺桥向作用产生的附加应力与轴向压应力组合超限,则应考虑设置临时拉索或临时支撑等结构。

临时水平横撑主动力的确定遵循内力控制为主、变形控制为辅的原则。斜拉桥索塔塔柱大多采用砼材料,刚度较大,计算所得理论主动力至少要能

抵消自重及施工荷载横桥向分量作用在最不利截面处产生的附加拉应力。主动力也不宜过大,防止横撑处砣出现裂缝。因为顶推力过大会引起横撑处出现过大横桥向位移,该处往往是设计配筋较薄弱的位置,随着砣塔柱高度的增大,塔柱外侧塔壁截面附加拉应力增大,超过控制值时会产生裂缝。横撑应力计算结果见图5。

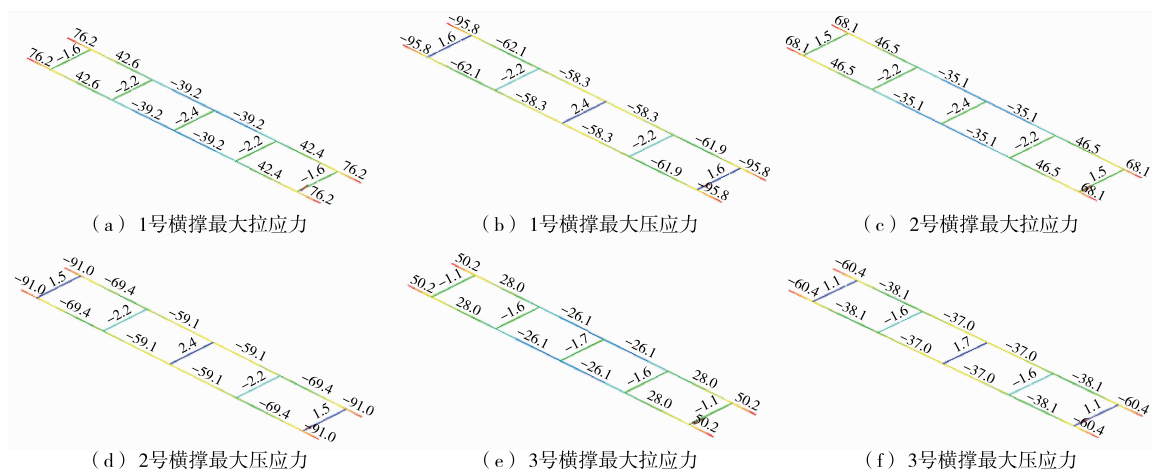


图5 横撑工作状态中最大拉、压应力(单位:MPa)

根据计算结果,每道横撑应力最大值均出现在刚设置在塔柱的阶段,横撑压应力最大值 $\sigma_1 = 95.8$  MPa,拉应力最大值 $\sigma_2 = 76.2$  MPa,均小于设计值 $\sigma = 215$  MPa。

### 3.3 设与不设横撑时主塔的横向位移

设与不设置横撑时主塔施工完成时主塔横向位移见图6。横撑的主要作用是控制截面线形及主塔施工过程中的稳定性。由图6可知:设置横撑时,主塔最大位移由不设横撑时的82.66 mm降至29.88 mm,减少63.85%。横撑的设置显著减少了位移,控制了主塔的位移变形,提高了工程的安全性。

### 3.4 不同温度下主塔的横向位移

横撑与主塔在施工过程中由于材料的线膨胀系数不同,升降温会导致横撑与主塔之间的作用力随温度变化而改变。根据实测数据,桥位处历史最高、最低气温分别为37.2、3℃,月平均最高、最低气温分别为28.7、14℃,年均温度为22~23℃;4月中旬—11月上旬各旬平均温度超过22℃,11月—翌年3月月平均气温都低于12℃。该桥横撑设置到撤掉的时间为6—12月,考虑横撑在施工过程中对温度的敏感性对主塔成桥线形及内力的影响,拟定整体升温20℃、整体降温20℃两种工况进行计算,

计算结果见图7。

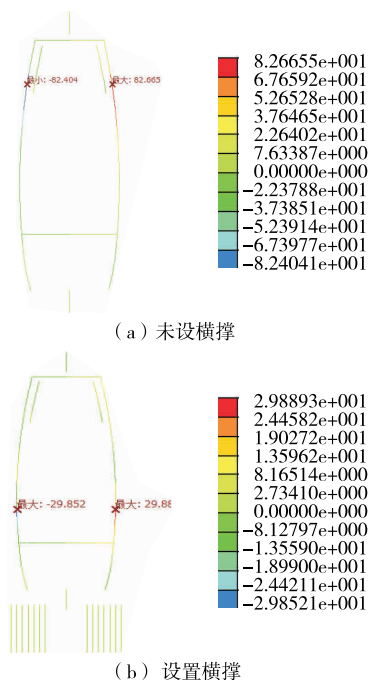


图6 设与不设横撑时主塔施工完成时  
横向位移云图(单位:mm)

由图7可知:主塔最大横向位移发生在降温20℃时,达37.8 mm。塔柱施工完成时单侧横向最

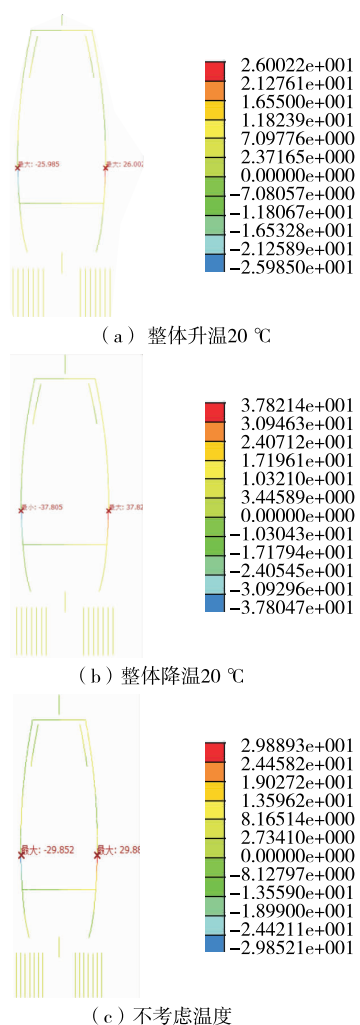


图 7 不同温度工况下主塔位移云图(单位:mm)

大位移为  $37.8 \text{ mm} < L/3\ 000 = 125 \times 1\ 000/3\ 000 = 41.67 \text{ mm}$  ( $L$  为塔柱高度), 满足规范要求。

#### 4 结语

该文针对大跨度斜拉桥主塔结构在施工荷载作用下的受力性能和变形进行计算分析, 主要结论如

下: 1) 主塔关键截面的最大压应力为  $23.1 \text{ MPa}$ , 最大拉应力为  $1.73 \text{ MPa}$ , 均满足规范要求; 2) 有效的横撑设置可使主塔横向位移减少  $52.78 \text{ mm}$ , 使变形在允许范围内; 3) 温度降低  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 局部位移变形增加  $7.95 \text{ mm}$ , 需加强变形观测和控制。

该桥主塔横撑设置方式和桥梁受力分析方法可为同类桥梁设计提供参考。考虑到该桥跨径只有  $328 \text{ m}$ , 塔高也不大, 计算结果存在一定局限性, 且桥塔形状独特, 参考时需注意主塔内倾角及横撑设置高度, 有限元模型建立宜采用以曲代直的方法。

#### 参考文献:

- [1] 曹永睿, 李艳花. 斜拉桥主塔钢混结合段受力分析研究[J]. 市政技术, 2013, 31(4).
- [2] 姚寅初. 斜拉桥塔梁临时固结节段主塔局部受力特性分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [3] 刘占兵, 左生荣, 魏英明, 等. 丹江口汉江大桥下横梁支架施工结构分析[J]. 交通科技, 2014(6).
- [4] 程强. 基于 MIDAS/Civil 的水上钢支架受力分析[J]. 建筑技术开发, 2016, 43(9).
- [5] 陈冠, 殷新锋, 刘扬. 静载作用下桥梁结构受力分析[J]. 公路与汽运, 2018(2).
- [6] 姚德波, 汪林, 殷新锋. 嘉鱼长江公路大桥主塔下横梁支架计算分析[J]. 公路与汽运, 2018(2).
- [7] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- [8] JTG D60—015, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [9] JTG/T D60—01—2016, 公路桥梁抗风设计规范[S].
- [10] 刘志权, 石雪飞, 阮欣. 空间索面斜拉桥索塔钢锚梁性能及足尺模型试验[A]. 第 20 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册)[C]. 2011.

收稿日期: 2018—06—13

(上接第 111 页)

- application to dry inclined cable galloping[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006, 22(2).
- [6] 阎超. 计算流体力学方法及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
  - [7] 金家传. 基于 CFD 方法的大跨双幅桥梁气动干扰效应研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
  - [8] 王润建, 李海光. 基于 CFD 方法的大跨高墩刚构桥梁风荷载数值识别[J]. 公路交通科技, 2010, 27(10).

- [9] 戴天帅. 基于 CFD 桥梁典型断面三分力系数差异分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [10] 安里鹏, 李德建, 王元礼, 等. 基于 CFD 方法的高墩大跨箱梁桥静风力系数参数影响研究[J]. 应用力学学报, 2016, 33(1).
- [11] 程浩. 基于计算流体力学(CFD)的大跨度桥梁风效应数值模拟[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(3).

收稿日期: 2018—03—20