

# 乌江特大桥 H 型索塔施工过程 力学特性与监控研究

龚美<sup>1,3</sup>, 陈广生<sup>2</sup>, 孙吉彪<sup>2</sup>, 饶军应<sup>3</sup>, 向嵩<sup>3</sup>

(1. 贵州大学土木工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 211100;  
3. 贵州省交通建设工程质量监督局, 贵州 贵阳 550081)

**摘要** 目的 研究特大桥 H 型索塔施工过程的力学特性演化, 探索各施工工况 H 型索塔整体应力水平、结构安全可靠、施工安全保障, 为实际工程应用提供合理的设计施工依据. 方法 依据乌江特大桥 H 型索塔结构工程特点, 合理设置对拉和对撑控制系统, 有效控制索塔结构在各施工阶段均处于许可应力范围, 使斜拉桥 H 型索塔下塔柱外倾、中塔柱内倾施工增高的过程中, 下塔柱内侧及中塔柱外侧根部混凝土会产生拉应力而影响施工安全, 为此建立索塔渐变截面的下、中塔柱内力与施工高度关系的力学计算公式开展分析, 基于索塔实际施工阶段划分进行施工过程力学建模、数值计算与监控量测分析. 结果 下、中塔柱施工中的最大拉应力大于塔柱材料的抗拉强度极限值; 索塔塔柱施工过程顺桥向平均偏位绝对值 8.2 mm、横桥向为 3.5 mm、最大拉应力为 0.96 MPa, 满足现行规范要求. 结论 乌江特大桥索塔采用撑拉系统辅助施工方案, 可有效控制柔性索塔施工过程中的偏位及最大拉应力, 保证了结构的施工受力安全, 研究结果对特大桥 H 型索塔的设计和施工具有指导意义.

**关键词** 斜拉桥; 索塔; 斜塔柱; 塔柱施工; 数值模拟; 撑拉系统

中图分类号 TU997; U448.27

文献标志码 A

## Study on the Mechanical Properties and Monitoring of H-shape Cable Tower Construction Process for Wujiang Bridge

GONG Mei<sup>1,3</sup>, CHEN Guangsheng<sup>2</sup>, SUN Jibiao<sup>2</sup>, RAO Junying<sup>3</sup>, XIANG Song<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang, China, 550025; 2. Jiangsu Transportation Research Institute Group Co. Ltd., Nanjing, China, 211100; 3. Guizhou Province Communications Construction Engineering Quality Supervision Bureau, Guiyang, China, 550081)

收稿日期: 2016-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608141); 贵州省交通运输厅科技项目(2016-123-047, 2014-121-046)

作者简介: 龚美(1982—), 女, 高级工程师, 主要从事交通建设工程质量安全监督和管理研究.

**Abstract:** Study the mechanical characteristics evolution of H-shape cable tower construction process of extra-large bridge, explore the overall stress level of H-shape cable tower, structure safety and reliability, construction safety and security, provide reasonable design and construction basis for practical engineering application. According to the structural engineering characteristics of H-shape cable tower of Wujiang river bridge, reasonable setting of control system, the effective control cable tower structure is in allowable stress range in each construction stage, and influence construction safety, the mechanical calculation formula of gradual change cross-section of cable tower is established, mechanical modeling, numerical calculation and monitoring analysis based on actual construction stage. The numerical simulation of the cable tower construction process shows that the maximum tensile stress in the construction of the tower is greater than the ultimate tensile strength of Pillar material, the absolute value of the average deviation is 8.2 mm, the maximum tensile stress is 3.5 mm, and the maximum tensile stress is 0.96 MPa. The support construction scheme of support drawing system for the cable tower of Wujiang extra bridge is adopted, can effectively control the deviation and maximum tensile stress of flexible cable tower construction, ensure the safety of construction, and obtain better construction effect and social and economic benefits. The results have guiding significance for the design and construction of H-shape cable tower.

**Key words:** cable stayed bridge; cable towers; inclined tower column; tower column construction; simulations; support and pull system

随着国家西部路网大规划建设,公路和铁路工程中的大型桥梁工程越来越多.为增加桥梁的跨度,往往采用斜拉或悬索结构经济结构形式,在其跨中要设置一定数量的索塔,H型索塔因其抗风、抗震性能好而被广泛采用.安徽铜陵大桥和上海南浦大桥等均采用了H型索塔.实际工程中,H型索塔的上、下塔柱常向内、外侧倾斜,截面型式各异.因此,H型索塔在施工和工作状态中力学机理复杂,下塔柱因其在施工的某些时段将承受一定拉力而备受工程师们关注.针对索塔的力学机理研究分为三类:施工控制(实践)、模型试验(试验)及力学机理(理论).在施工控制研究中,吴湘明<sup>[1]</sup>归纳总结了以湖北荆州长江公路大桥42#主墩索塔的主要技术措施和施工方案;张门哲<sup>[2]</sup>分析了日照温差对索塔产生温度拉应力的不利影响;胡晓东等<sup>[3]</sup>探讨了索塔塔柱与下横梁同、异步施工的受力及线形变化问题;在下横梁设后浇段或分层浇筑施工方案比选分析中,封江东等<sup>[4]</sup>认为分层浇筑方案在施工风险、施工费用和工期均更具优势;荣国城等<sup>[5]</sup>分析了港珠澳大桥的三塔斜拉桥认为整体式钢索塔装

配化施工可缩短海上作业时间,降低风险.在模型试验中开展索塔锚固区模型的试验研究,单炜等<sup>[6]</sup>给出了松花江大桥索塔锚固区的节段的开裂荷载及抗裂安全系数;张奇志等<sup>[7]</sup>发现斜拉桥钢-混组合索塔锚固区节段索孔出口结合面处抗裂性能及强度有待提高;刘钊等<sup>[8]</sup>认为U形预应力索的布置形式对索塔的预压应力场有较大的影响;崔楠楠等<sup>[9]</sup>则探讨了斜拉桥单向预应力体系索塔锚固区的传力机理.另外,斜拉桥钢箱梁-混凝土索塔结合段也是研究的重点,樊健生等<sup>[10]</sup>认为梁-塔间的轴向力及弯矩是由钢梁端部的承压钢板及锚固于索塔内的预应力束来传递,并可有效防止索塔的混凝土开裂.针对力学机理研究,以苏通大桥为研究对象,陈开利<sup>[11]</sup>、郑舟军等<sup>[12]</sup>、苏庆田等<sup>[13]</sup>、阮欣等<sup>[14]</sup>不仅进行了施工风险评估,还分别建立了内置式和外露式钢锚箱结构实体模型,对比分析结构受力机理及特性,揭示钢锚箱中受力最大位置发生在侧面拉板靠下部的圆倒角处,索孔出口下边缘处钢有最大主拉应力.刘吉波<sup>[15]</sup>通过分析监测数据发现索塔裂缝存在“温变性”现象,基于金属构件裂纹闭合

理论计算了索塔裂缝的尖端应力特性;宋军<sup>[16]</sup>则对混凝土索塔的开裂行为进行了宏观、细观的深入分析;蒋金洋<sup>[17]</sup>基于可靠度理论建立了混凝土索塔结构的抗裂度分析模型,认为混凝土 28 d 抗拉强度需达 4.54 MPa 才可满足后期抗裂度要求.赵刚<sup>[18]</sup>分析了某钢-混结构索塔独塔斜拉桥成桥状态下索塔应力分布规律及变形特征.

尽管学者们对索塔进行了大量研究,但在索塔的力学机理研究方面,更多是着眼于索塔锚固区与抗裂度的分析.而开展特大桥 H 型索塔施工过程力学特性深入研究,合理设置对拉和对撑系统,有效控制索塔结构在各施工阶段均处于许可应力范围,使各施工工况下 H 型索塔整体应力水平较低、结构安全可靠、保障施工安全显得尤为重要.基于此,笔者依托乌江特大桥 H 型索塔施工过程,从力学模型、施工监测、数值仿真三方面

出发,对其力学机理展开相关研究,构建的力学模型可为分析类似工程的索塔受力特性提供参考.

## 1 工程概况

乌江特大桥主桥长 620 m,为双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,跨径布置为 40 m + 110 m + 320 m + 110 m + 40 m,塔墩处设支座,纵向半漂浮体系(见图 1).遵义侧主塔(4 号塔)为“H”型桥塔,承台以上高度为 143.1 m.贵阳侧主塔(5 号塔)为组合式桥塔:下部为双柱式塔墩,上部为“H”型桥塔,承台以上高度为 197.1 m.其中,“H”型桥塔分为上塔柱、上横梁、中塔柱、下横梁、下塔柱 5 大部分.上塔柱高 60.6 m,中塔柱高 39 m,下塔柱高 43.5 m.上、中、下塔柱及上、下横梁均采用空心矩形截面.索塔采用 C50 混凝土浇筑,主塔采用爬模法分节段施工.

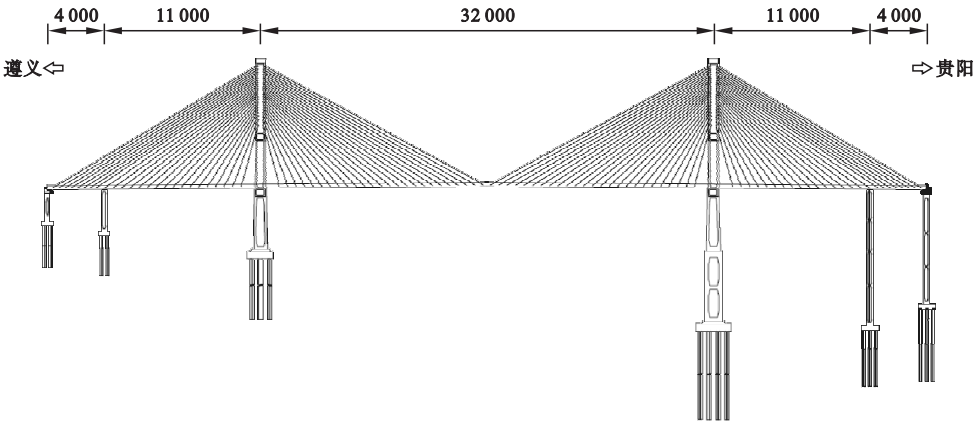


图1 乌江特大桥总体结构布置图

Fig.1 General layout plan of Wujiang grand bridge

## 2 下塔柱及中塔柱施工过程力学分析

### 2.1 塔柱施工过程力学分析

#### (1)下塔柱施工过程力学模型

索塔下塔柱布置形式见图 2. 由于两侧下塔柱外倾,其自重  $G$  可分解为垂直于塔身方向的分力  $G_1$  及平行于塔身方向的分力  $G_2$ . 显然,  $G_1$  和  $G_2$  将分别使下塔柱受弯和

受压. 现取图 2 中右侧外倾塔柱进行受力分析,计算结构图如图 3 所示.

由图 3 可得如下几何关系:

$$l \cdot \tan \varphi + b = a + l \cdot \tan \theta. \tag{1}$$

整理式(1)得:

$$b - a = l \cdot (\tan \theta - \tan \varphi). \tag{2}$$

此外,由图 3 还可得到 A、B、C、D 各点的坐标分别为  $A(0,0)$ 、 $B(a,0)$ 、 $C(l \cdot \tan \varphi, l)$ 、 $D(a + l \cdot \tan \theta, l)$ ,故可得 AB 及 CD 的中点坐标分别为

$E(a/2,0)、F(\frac{l \cdot (\tan\varphi + \tan\theta)}{2},l)$ . 因此有  
 $\overline{EF}=(\frac{l \cdot (\tan\varphi + \tan\theta)}{2},l)$ . 若设塔柱中线与  
竖直方向的夹角为 $\gamma$ (见图4),则可得:

$$\tan\gamma = \frac{\tan\varphi + \tan\theta}{2}. \tag{3}$$

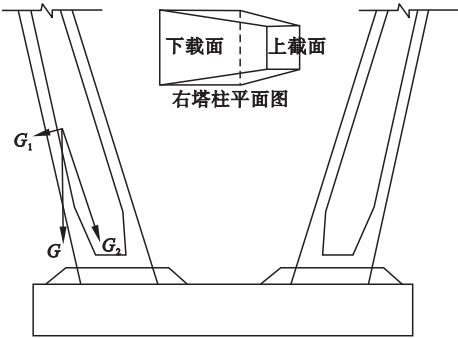


图2 下塔柱结构受力图

Fig.2 The force diagram of pillar structure

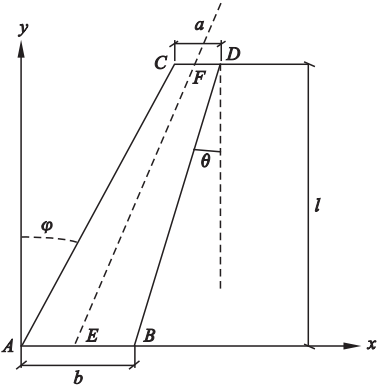


图3 外倾下塔柱计算结构图

Fig.3 The calculation structure diagram of pillar incline

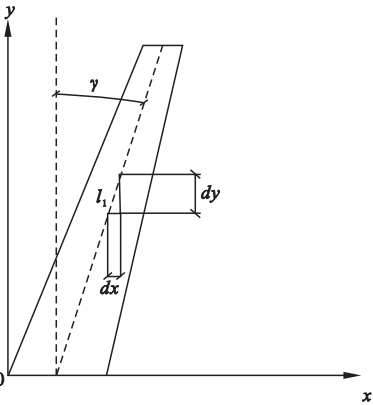


图4 下塔柱微元选取示意图

Fig.4 Schematic diagram of pillar selection

图5 为下塔柱侧面计算简图,由此可得:  
 $c - d = 2l \cdot \tan\alpha.$  (4)

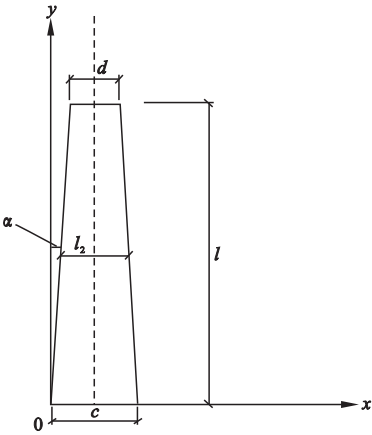


图5 外倾下塔柱侧面计算图

Fig.5 Side schematic diagram of the pillar

基于图4及图5中坐标关系,对塔柱根部进行施工受力计算.由图4可得:

$$dy = \frac{dx}{\tan\gamma} \text{ 或 } y = \frac{x}{\tan\gamma}. \tag{5}$$

而图4及图5的 $l_1、l_2$ 可分别表示为

$$\begin{aligned} l_1 &= a - \frac{a-b}{l} \times \frac{x}{\tan\gamma}, \\ l_2 &= c - \frac{c-d}{l} \times \frac{x}{\tan\gamma}. \end{aligned} \tag{6}$$

若设现浇塔柱的重力密度为 $\rho$ ,则微元的质量为

$$m_i = \rho \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot dy = \rho \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \frac{dx}{\tan\gamma}. \tag{7}$$

则微元对塔柱根部产生的力矩可表示为

$$M_i = m_i \cdot g \cdot x = \rho \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \frac{dx}{\tan\gamma} \cdot g \cdot x. \tag{8}$$

故对塔柱根部产生的总弯矩为

$$M = \sum M_i = \int_0^{l \tan\gamma} \rho \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot g \frac{x dx}{\tan\gamma}. \tag{9}$$

整理式(9)可得:

$$\begin{aligned} M &= \rho g l^2 \tan\gamma \left\{ \frac{1}{2} a c + \frac{1}{4} (a-b)(c-d) - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{3} [a(c-d) + c(a-b)] \right\}. \end{aligned} \tag{10}$$

将式(2)~式(4)代入式(10),整理后可得:

$$M = \frac{1}{2} \rho g l^2 (\tan \varphi + \tan \theta) \left\{ \frac{1}{2} ac + \frac{l^2}{2} \tan \alpha (\tan \varphi - \tan \theta) - \frac{l}{3} [2a \tan \alpha + c (\tan \varphi - \tan \theta)] \right\}. \quad (11)$$

式(11)为施工过程中下塔柱的弯矩与施工高度的关系式.

(2)中塔柱施工过程力学模型

按上述分析同样可建立中塔柱施工过程的力学模型. 由于中塔柱为等截面构件, 故对中塔柱来说, 其侧立面的上、下边长相等, 即:

$$c - d = 0 \text{ 或 } \alpha = 0. \quad (12)$$

将式(12)代入式(11), 即可获得中塔柱的弯矩表达式:

$$M = \frac{1}{4} \rho g l^2 (\tan \varphi + \tan \theta) \left[ ac + \frac{2lc}{3} \times (\tan \varphi - \tan \theta) \right]. \quad (13)$$

2.2 依托工程塔柱施工过程受力分析

依托工程塔柱尺寸如图6和图7所示.

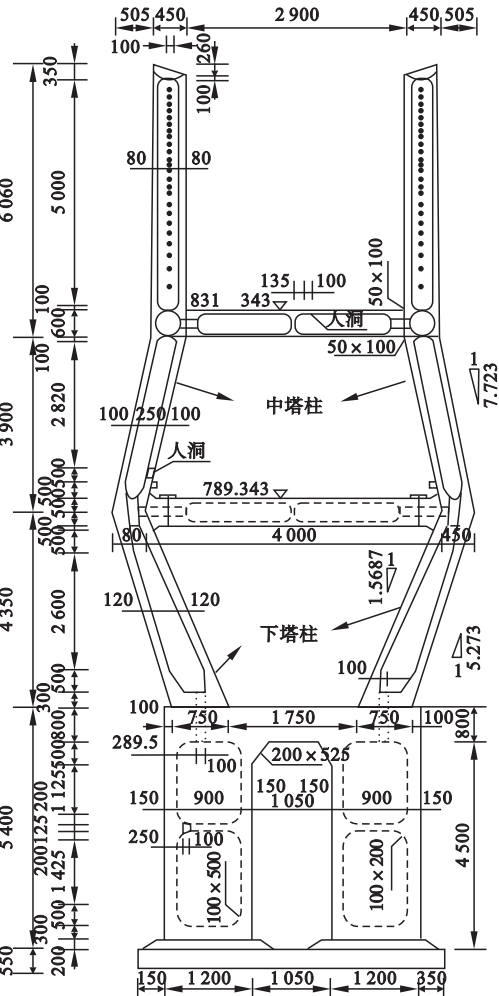


图6 索塔正立面图

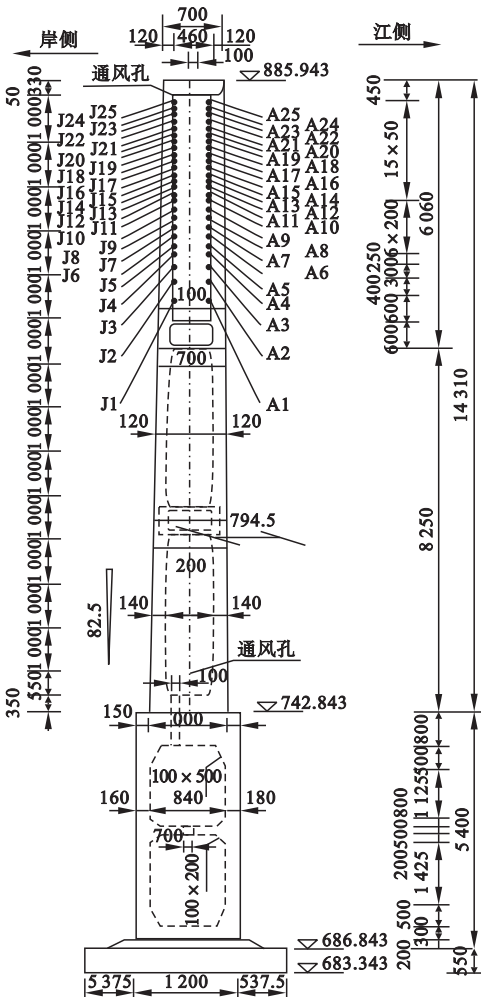


图7 索塔侧立面图

Fig. 7 Side elevation diagram of cable tower

依托工程塔柱为C50混凝土浇筑而成的钢筋混凝土结构, 根据混凝土结构设计规范, C50混凝土的抗拉强度1.89 MPa, 而钢筋混凝土构件的重力密度可取为25 kN/m<sup>3</sup>. 再将下塔柱、中塔柱实际尺寸、材料参数等数据(见图6和图7)代入式(11)与式(13), 可分别计算得:

下塔柱施工完成后, 根部总弯矩为  $M_{\text{下}} = 188\,817.32 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ;

中塔柱施工完成后, 根部总弯矩为  $M_{\text{中}} = 86\,255.52 \text{ kN} \cdot \text{m}$ .

结合下塔柱、中塔柱截面特征与实际参

Fig. 6 Facade diagram of cable tower



数,可计算得二者最大拉应力分别为

$$\sigma_{\text{下,max}} = 2.34 \text{ MPa} > 1.89 \text{ MPa}, \quad (14)$$

$$\sigma_{\text{中,max}} = 3.22 \text{ MPa} > 1.89 \text{ MPa}. \quad (15)$$

由式(14)和式(15)可判定,若不采取相应措施,下塔柱与中塔柱必将在施工到某一高度时出现拉裂破坏.

令最大拉应力  $\sigma_{\text{下,max}}$ 、 $\sigma_{\text{中,max}}$  分别等于材料的抗拉强度极限值(1.89 MPa),则可反算得不采取措施时安全施工的最大长度. 计算结果:当下塔柱施工长度达  $l_{\text{下,max}} = 33.23 \text{ m}$ 、中塔柱施工长度达  $l_{\text{中,max}} = 14.83 \text{ m}$  时,最大拉应力分别达到 C50 混凝土的抗拉强度. 但是,考虑施工时需具备一定安全储备,而且材料需养护一定时间才能达到设计强度,故计划控制界面拉力小于 1.0 MPa. 因此,有必要在下塔柱及中塔柱施工时采取必要的保护措施,防止其拉裂或发生生产事故.

3 斜塔柱施工过程中破坏机理

由图 2 可以看到,随着塔柱浇筑高度不断增加,重力不断增大,  $G_1$  产生的附加弯矩也不断变大,当附加弯矩值增大到某一临界值后,弯矩在塔柱内侧产生的拉应力正好等于分力  $G_2$  产生的压应力. 此后,下塔柱内侧混凝土将由受压转变为受拉,若拉应力超过塔柱混凝土自身抗拉强度值,则混凝土将产生受拉破坏裂缝. 因此,在下塔柱内侧混凝土出现拉应力之前,必须施加主动预应力以使塔柱内侧混凝土呈现受压状态,特别是浇筑下横梁第一次混凝土前,应给予塔柱内侧混凝土一定的压应力储备,防止下塔柱在下横梁重力作用下出现拉应力甚至出现裂缝或破坏. 中塔柱的破坏机理与下塔柱一样,而中塔柱塔肢内倾,与下塔柱正好相反,可见随着塔柱浇筑高度不断增加,塔柱外侧混凝土将由受压转变为受拉,如果拉应力超过塔柱混凝土自身抗拉强度值,则混凝土将产生受拉破坏裂缝. 因此,在中塔柱外侧混凝土出现拉应力之前,必须预先施加主动支撑力以使塔柱

外侧混凝土呈受压状态,防止出现拉应力导致混凝土拉破坏.

4 塔柱浇筑节段划分及施工计划

基于上述分析,对塔柱施工节段步骤划分如图 8 所示,图中数字 1 至 33 分别表示第 1 至第 33 浇筑节段.

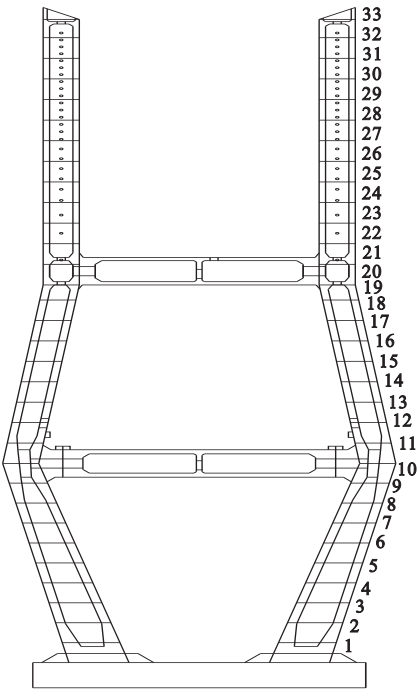


图 8 索塔浇筑节段划分图

Fig. 8 Schematic diagram of casting segment of cable tower

(1)下塔柱施工计划. 塔柱第 7 节施工完成,索塔浇筑爬模机继续爬升就位,在浇筑第 8 节前安装第一道水平拉杆. 第一层水平拉杆单根精轧螺纹钢预张拉力 400 kN,单侧 6 根,共 12 根,合计 4 800 kN,对称分级张拉. 塔柱继续施工直至完成第 10 节,爬模继续爬升就位,安装第一道水平拉杆后再进行第 11 节段浇筑施工.

(2)中塔柱施工计划. 二层水平拉杆单根精轧螺纹钢预张拉力 300 kN,单侧 6 根,共 12 根,合计 3 600 kN,对称分级张拉. 塔柱继续施工至完成第 14 节,爬模继续爬升就位,在浇筑第 15 节前完成下横梁施工. 塔

柱施工至完成第16节,爬模继续爬升就位,在开始浇筑第17节前安装第一层水平撑.第一层水平撑单根撑杆施加的主动顶撑力为1 000 kN,共2根,合计2 000 kN,须同时对称施加.考虑到水平撑安装和改善水平撑架受力,故应提前施工上横梁支架中间四根立柱,立柱上设置牛腿.塔柱继续施工至完成第19节,爬模继续爬升就位,在浇筑第20节前安装第二层水平撑.第二层水平撑单根撑杆施加的主动顶撑力为900 kN,共2根,合计1 800 kN,也须同时对称施加.塔柱继续施工至完成第24节,爬模继续爬升就位,在浇筑第25节前完成上横梁施工.

(3)临时支撑与主塔.斜塔柱施工中的临时支撑应在达到拆模强度后自上而下逐层拆除.之后主塔继续施工至封顶.

5 施工过程数值模拟分析

5.1 计算模型及主要荷载

根据上述施工阶段划分,考虑实际施工过程中作用荷载及桥塔结构体系的变化等,采用Midas软件建立相应的索塔结构有限元模型(见图9).

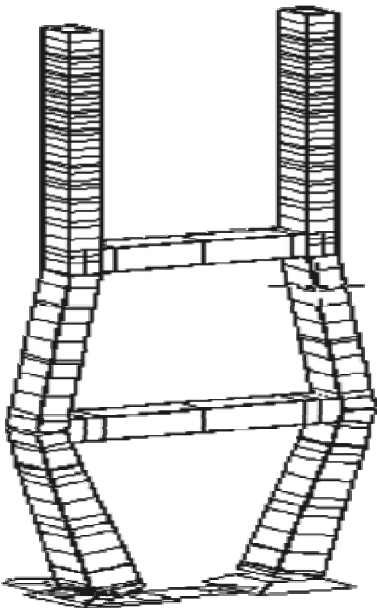


图9 索塔结构有限元模型

主塔整体结构采用梁单元模拟,在下塔柱钢绞线对拉处采用施加节点荷载来模拟钢绞线张拉效应;中塔柱则直接建立梁单元模拟钢管横撑作用.模型边界条件:塔底采用完全固结约束;模型荷载:结构自重及塔柱施工时爬模重量100 kN;材料属性:主塔为C50混凝土,钢管横撑为Q235钢材.

5.2 计算结果及分析

主塔柱爬模施工共划分40个施工工况.阶段累计效应包括:结构自重、预应力效应、收缩效应、徐变效应.

(1)主塔柱爬模施工过程应力情况.主塔柱爬模施工时所有40个工况的应力包络图如图10和图11所示.其中最大拉应力为0.7 MPa,出现在主塔根部;最大压应力为4.7 MPa,出现在下塔柱第3节段附近.

(2)主塔柱爬模施工过程偏位情况.主塔柱爬模施工过程各个典型施工节段的累计水平偏位如图12~图14所示.

通过上图分析主塔累计水平偏位值可知,爬模施工主塔的最大水平偏位为11.6 mm,出现在上塔柱浇筑完毕工况,出现中塔柱位置的中间段,满足文献[19]要求.

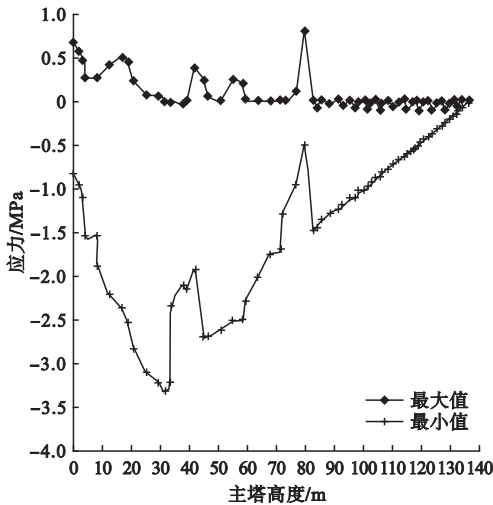


图10 主塔外侧爬模施工应力包络图

Fig. 10 Construction stress envelope diagram of outside climbing form of main tower

Fig. 9 Finite element model of tower structure

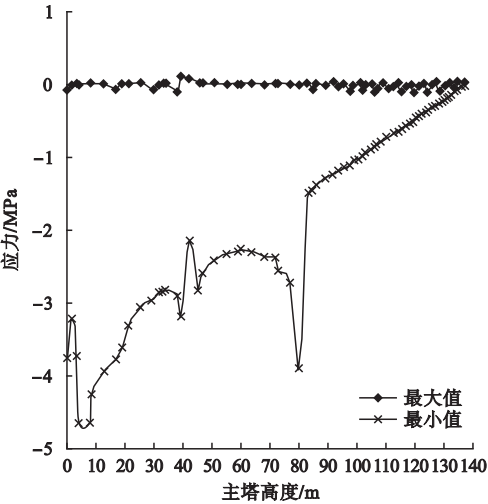


图 11 主塔内侧爬模施工应力包络图

Fig. 11 Construction stress envelope diagram of main tower inner side wall

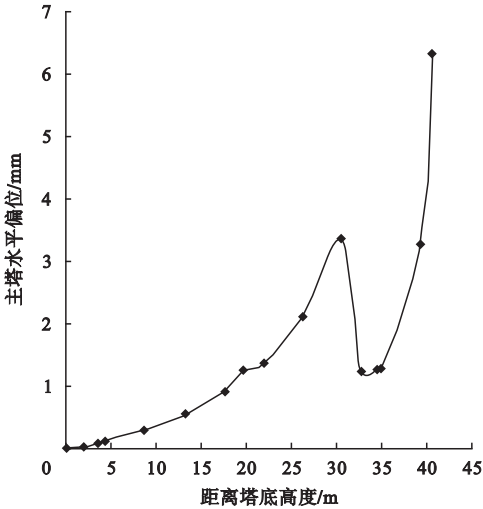


图 12 下塔柱对拉预应力束后累计水平偏位

Fig. 12 The cumulative horizontal deviator displacement of the pillar on the tensioning prestress

6 施工监控量测与数据分析

6.1 测点布置

为保障施工安全,对依托工程 4 号索塔进行了关键部位典型断面的施工监测,其测点布设与编号情况见图 15,其中 M 表示截面号,可取 A、B 或 C.

6.2 监测数据与分析

(1) 塔柱偏位监测结果. 由于“4 左 -

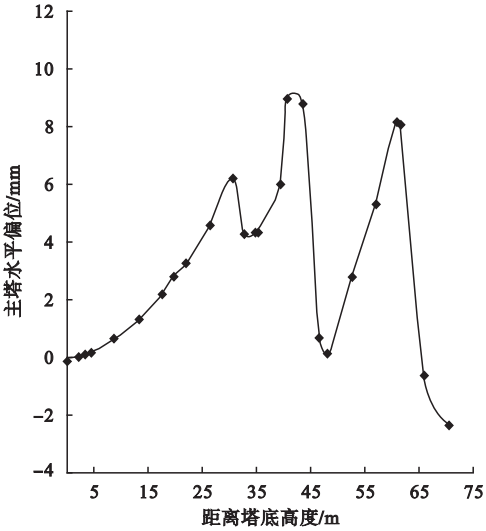


图 13 中塔柱设第一道横撑后累计水平偏位

Fig. 13 Cumulative horizontal deviator displacement of middle tower column after the first ballast pile setting

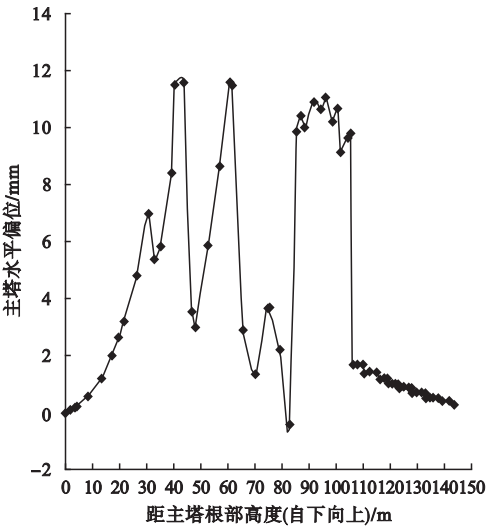


图 14 主塔施工完成后累计水平偏位

Fig. 14 Cumulative horizontal deviator displacement after completion of main tower construction

XC-1”测点被破坏,“4 右 - XC-2”测点被钢管支架遮挡,在第 29 节段施工完成后,测得 B、C 截面其余测点的偏位数据如表 1 所示. 监测结果表明,4 号索塔顺桥向平均偏位绝对值 8.2 mm,横桥向为 3.5 mm,满足文献 [19]要求.



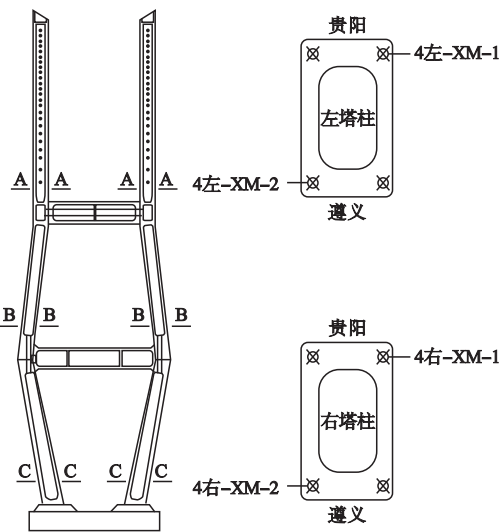


图 15 主塔施工监测断面布置

Fig. 15 Layout plan of monitoring section in main tower construction process

(2)塔柱应力监测结果. 经对 4 号塔柱的底面(C-C 截面)、下横梁(B-B 截面)及上横梁(A-A 截面)处进行施工阶段应力监测,获得 3 个截面各测点的应力结果如图 16~图 18 所示.

分析图中实测应力数据可知,在塔柱 C-C 截面,当第 8 节段浇筑施工后,在测点“4 右-YC-1 内侧”处有最大拉应力(0.96 MPa),且该测点在第 30 和 31 节段浇筑施工后有最大压应力(3.46 MPa);在塔柱 B-B 截面,当第 20 节段浇筑施工后,在测点“4 左-YB-1 内侧”处有最大拉应力(0.39 MPa),而在第 30 和 31 节段浇筑施工后测点“4 左-YB-2 外侧”处有最大压应力(2.81 MPa);当施工至塔柱 A-A 截面以

表 1 4 号塔测点数据

Table 1 Data summary of monitoring point of pillar 4

4 号塔	位置	顺桥向偏位 $\Delta X/\text{mm}$		横桥向偏位 $\Delta Y/\text{mm}$	
		实测值	理论值	实测值	理论值
4 右-XC-1	下塔柱大桩号右幅	-8	0	4	0
4 左-XC-2	下塔柱小桩号左幅	-11	0	10	0
4 左-XB-1	中塔柱大桩号左幅	-6	0	-3	-3.3
4 左-XB-2	中塔柱小桩号左幅	-7	0	4	-3.3
4 右-XB-1	中塔柱大桩号右幅	-12	0	2	3.3
4 右-XB-2	中塔柱小桩号右幅	-5	0	3	3.3

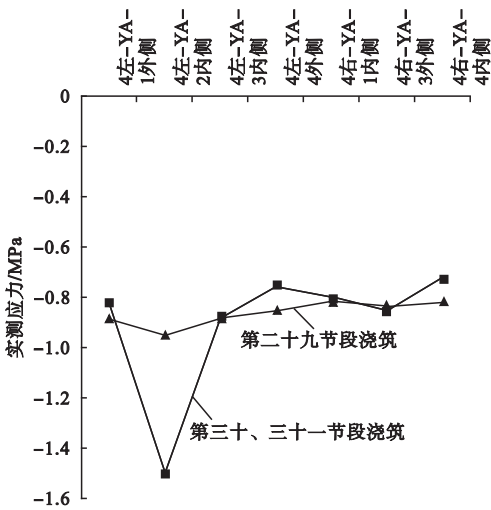


图 16 A-A 截面各施工阶段实测应力

Fig. 16 Measured stress of each construction stage of section A-A

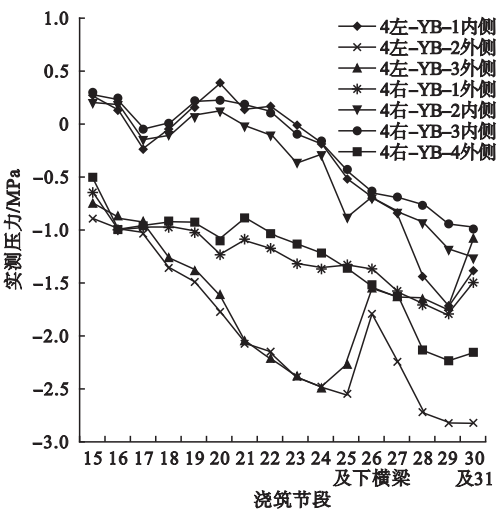


图 17 B-B 截面各施工阶段实测应力

Fig. 17 Measured stress of each construction stage of section B-B

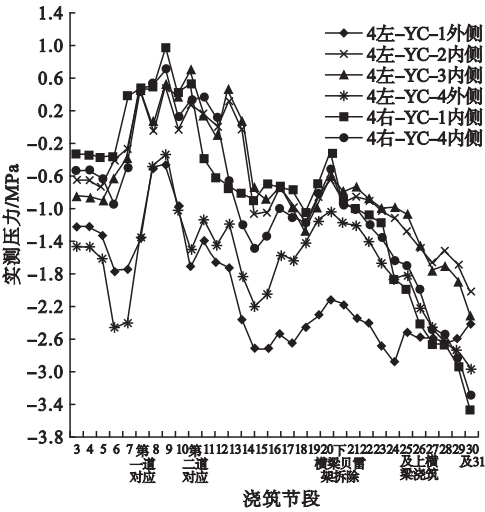


图 18 C - C 截面各施工阶段实测应力  
Fig. 18 Measured stress of each construction stage of section C-C

上时,A - A截面处处受压,在第 30 和 31 节段浇筑施工后测点“4 左 - YA - 2 内侧”处有最大压应力(1.50 MPa). 显然,在塔柱浇筑施工过程中,经采取拟定的撑拉系统辅助施工措施后,塔柱各截面的最大拉应力均被控制在设计要求(1.0 MPa)以内.

7 结 论

- (1)依托乌江特大桥索塔,推倒给出了乌江特大桥索塔渐变截面的下、中塔柱内力与施工高度的关系式.
- (2)索塔施工过程数值模拟分析表明,下、中塔柱施工中的最大拉应力分别为 2.34 MPa、3.22 MPa,二者均大于塔柱材料的抗拉强度极限值 1.89 MPa.
- (3)索塔塔柱施工过程位移与应力监测结果显示,索塔顺桥向平均偏位绝对值 8.2 mm,而横桥向为 3.5 mm,最大拉应力为 0.96 MPa,满足现行规范要求.
- (4)乌江特大桥索塔采用撑拉系统辅助施工方案,可有效控制柔性索塔施工过程中的偏位及最大拉应力,保证了结构的施工受力安全,取得了较好的施工效果及社会、经济效益.

参考文献

[ 1 ] 吴湘明. 斜拉桥 H 型索塔施工控制[J]. 国外公路,2000,20(3):41-44.  
(WU Xiangming. Construction control of hypylon tower of cable-stayed bridge[J]. Chinese and foreign highway,2000,20(3):41-44.)

[ 2 ] 张门哲. 大跨预应力混凝土斜拉桥施工控制及索塔温度效应分析[D]. 长沙:湖南大学,2004.  
(ZHANG Menzhe. Construction control and tower tower temperature effect analysis of long-span prestressed concrete cable-stayed bridge[D]. Changsha:Hunan University,2004.)

[ 3 ] 胡晓东,陈平. 甬江铁路斜拉桥索塔塔梁同异步施工方法对比分析[J]. 铁道标准设计,2016(2):89-92.  
(HU Xiaodong, CHEN Ping. Comparative analysis of asynchronous construction method of cable-stayed bridge tower of Yong railway bridge[J]. Railway standard design,2016(2):89-92.)

[ 4 ] 封江东,陈毅明,陈楚龙. 沌口长江公路大桥主桥索塔下横梁施工方案比选[J]. 中外公路,2016,36(3):201-206.  
(FENG Jiangdong, CHEN Yiming, CHEN Chulong. Comparison and selection of construction scheme of lower beam of main bridge tower of Yangtze river highway bridge[J]. Chinese and foreign highway,2016,36(3):201-206.)

[ 5 ] 荣国城,陈儒发,唐维,等. 大跨度三塔斜拉桥整体式钢索塔设计与施工关键技术[J]. 公路,2016(5):278-282.  
(RONG Guocheng, CHEN Rufa, TANG Wei, et al. Key technology of integral beam design and construction of long-span three cable-stayed bridge[J]. Highway,2016(5):278-282.)

[ 6 ] 单炜,李玉顺,于玲,等. 异形截面斜拉桥索塔锚固区节段足尺模型试验研究[J]. 中国公路学报,2005(3):60-65.  
(SHAN Wei, LI Yushun, YU Ling, et al. Full scale model test of segment anchorage zone of cable-stayed bridge with special-shaped cross section[J]. China journal of highway and transport,2005(3):60-65.)

[ 7 ] 张奇志,李明俊. 斜拉桥钢-混组合索塔锚固区节段模型试验研究[J]. 桥梁建设,2006(3):16-19.  
(ZHANG Qizhi, LI Mingjun. Segmental model

- test of steel and steel-concrete composite tower anchorage zone of cable-stayed bridge [J]. Bridge construction, 2006(3):16-19. )
- [8] 刘钊, 孟少平, 吕志涛. 两座大型斜拉桥索塔锚固区模型试验及对比研究[J]. 中国工程科学, 2003, 5(12):48-54.  
(LIU Zhao, MENG Shaoping, Lü Zhitao. Model test and comparative study of anchor anchorage zone of two large cable-stayed bridge pylon [J]. Engineering science in China, 2003, 5(12):48-54. )
- [9] 崔楠楠, 贾布裕, 余晓琳, 等. 斜拉桥单向预应力体系索塔锚固区足尺模型试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(5):61-69.  
(CUI Nannan, JIA Buyu, YU Xiaolin, et al. Full scale model test on anchorage zone of one-way prestressed system of cable-stayed bridge [J]. Journal of Hunan university (natural science edition), 2016, 43(5):61-69. )
- [10] 樊健生, 聂建国, 吕坚锋, 等. 斜拉桥钢箱梁-混凝土索塔结合段的试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(7):61-66.  
(FAN Jiansheng, NIE Jianguo, LV Jianfeng, et al. Experimental study on the combination of steel box girder and concrete bent tower of cable-stayed bridge [J]. Civil engineering journal, 2008, 41(7):61-66. )
- [11] 陈开利. 钢锚箱索塔锚固区受力机理[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(4):58-64.  
(CHEN Kaili. Mechanical mechanism of steel anchor box anchorage zone of steel anchor box steel tower[J]. China railway science, 2008, 29(4):58-64. )
- [12] 郑舟军, 田晓彬, 余俊林, 等. 内置式钢锚箱索塔锚固区受力机理分析[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5):84-89.  
(ZHENG Zhoujun, TIAN Xiaobin, YU Junlin, et al. Mechanical analysis of built-in steel anchor box anchorage zone[J]. China journal of highway and transport, 2010, 23(5):84-89. )
- [13] 苏庆田, 曾明根. 斜拉桥混凝土索塔钢锚箱受力计算[J]. 结构工程师, 2005, 21(6):28-32.  
(SU Qingtian, ZENG Minggen. Force calculation of concrete pylon of cable-stayed bridge [J]. Structural engineer, 2005, 21(6):28-32. )
- [14] 阮欣, 陈艾荣, 欧阳效勇, 等. 超大跨径斜拉桥索塔施工期间风险评估与风险管理[J]. 桥梁建设, 2008(2):74-77.  
(RUAN Xin, CHEN Airong, OUYANG Xiaoyong, et al. Risk assessment and risk management of very large cable-stayed bridge tower construction [J]. Bridge construction, 2008(2):74-77. )
- [15] 刘吉波. 斜拉桥索塔温度场分析及索塔裂缝温变特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.  
(LIU Jibo. Analysis of temperature field of cable tower of cable-stayed bridge and Features characteristics of tower crack [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008. )
- [16] 宋军. 混凝土索塔开裂行为的宏观力学分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.  
(SONG Jun. Macroscopic micromechanics analysis of cracking behavior of concrete cable tower[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. )
- [17] 蒋金洋, 武胜萍, 刘加平, 等. 基于可靠度理论的超高索塔混凝土结构抗裂度分析[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(9):60-65.  
(JIANG Jinyang, WU Shengping, LIU Jiaping, et al. Resistance to analysis of concrete structure of UHV tower based on reliability theory [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2015, 37(9):60-65. )
- [18] 赵刚. 独塔斜拉桥异形钢-混结构索塔受力研究[J]. 山西交通科技, 2016(3):59-62.  
(ZHAO Gang. Study on mechanical behavior of special-shaped steel hybrid pylon of single tower cable-stayed bridge[J]. Shanxi science & technology of communications, 2016(3):59-62. )
- [19] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵施工技术规范: JTG/T F50—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
(Ministry of Transportation of the People's Republic of China. Construction Technical Code: JTG/T F50—2011 [S]. Beijing: China Communication Press, 2011. )