

# 拱形桥塔施工控制措施及温度效应分析

王文明<sup>1</sup>,柴生波<sup>1</sup>,聂宁波<sup>2</sup>,魏谦<sup>2</sup>

(1.西安科技大学,陕西 西安 710054;2.中铁十五局集团第一工程有限公司,陕西 西安 710018)

**摘要:**为确保斜拉桥拱形桥塔线形、内力满足设计要求,实现桥塔安全施工,该文通过建立有限元模型,研究拱塔施工期间线形及应力变化规律,分析温度效应对拱塔的影响,并提出相关控制措施。研究表明:仅考虑横桥向温度梯度作用时,同一温度梯度下,受日照影响的外侧塔肢拉应力大于内侧,两侧塔肢位移相同,并与日照方向一致;下横梁施工阶段及桥塔合龙阶段,桥塔温度效应减小;临时横撑的设置、顶推力的施加、预偏量的设置,能够有效地减小塔肢轴线位移及施工过程中塔肢拉应力,避免桥塔开裂;横撑顶推力施加后,可使桥塔轴线位移控制在5 mm以内;当设置两道横撑时,可不考虑临时横撑拆除顺序;对比实测与理论数据,进一步验证了临时横撑的设置、顶推力的施加,可以有效减小桥塔轴线偏差,以及温度梯度对桥塔线形和应力的不可忽略的影响。

**关键词:**拱形桥塔;施工控制;临时横撑;桥塔预偏量;温度效应

**中图分类号:**U445

**文献标志码:**A

## 0 引言

拱形桥塔作为新型桥塔形式,结构新颖美观。但其结构呈曲线内倾式,桥塔施工期间线形及应力较难控制。目前,针对拱形桥塔线形及应力控制研究相对较少,本文分析拱塔线形及应力变化规律,提出相关控制措施,实现拱塔线形及应力有效控制。

目前,桥塔多采用翻模、爬模施工<sup>[1-3]</sup>,对于桥塔线形及应力,常通过设置临时横撑并施加顶推力进行控制<sup>[4-8]</sup>。如杨成洪等<sup>[9]</sup>按照索塔线形、应力双控原则,确定了白马寺长江大桥桥塔水平横撑的设计方案;赵全成等<sup>[10]</sup>通过分析临时横撑拆除顺序,制定了合理的拆除方案,以规避临时横撑拆除施工风险;裴山等<sup>[11]</sup>研究得出,中塔柱横撑顶推力温度及焊缝收缩影响会削弱顶推效果;杨智文等<sup>[12]</sup>通过对下横梁预应力张拉工序优化,使主塔根部区域拉应力得到大大改善。除此之外,还有通过设置桥塔预偏量进行线形控制,如易云焜<sup>[13]</sup>通过设置桥塔纵向预偏量和预抛高的措施,进行曲线形独塔无背索斜拉桥桥塔线形控制;史晶等<sup>[14]</sup>为保证斜拉桥A形桥塔

的成桥线形,在桥塔施工时设置了横向预偏量,以抵消自重及临时施工荷载作用的影响。桥塔施工期间,外部环境因素对桥塔线形及应力影响不可忽略,如温度荷载、风荷载等。柳鑫星等<sup>[15]</sup>研究得出,对于拱形钢桥塔线形影响,日照温差大于季节温差;唐振洪<sup>[16]</sup>通过对益阳大桥温度影响分析,得出索塔在施工阶段温度变化对索塔变形影响最为显著;陈开桥等<sup>[1]</sup>考虑了风荷载的影响,对武汉大道金桥桥塔水平横撑进行了相关设计;程东亚<sup>[17]</sup>分析了索塔在静风荷载下的变形和受力,得到风荷载作用对索塔根部应力及塔顶变形影响最大。以上研究多针对常见桥塔形式的线形控制,对混凝土拱形桥塔的施工线形及内力控制的研究相对较少。此外,针对不同温度梯度作用下,拱形桥塔温度效应对塔肢线形及内力影响的相关研究也较为欠缺。

本文依托某在建拱形桥塔斜拉桥,构建拱塔有限元模型,分析拱塔线形及应力变化规律。从桥塔临时横撑位置、横撑顶推力施加大小、横撑拆除顺序、桥塔预偏量等方面,进行拱塔施工控制分析。并分析了温度效应对拱塔的影响,可为类似工程施工提供参考。

收稿日期:2022-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52178166)

作者简介:王文明,男,硕士研究生.E-mail:2256744799@qq.com

1 工程概况

某独塔双索面预应力混凝土斜拉桥,桥跨布置为(149+133) m,桥塔采用混凝土拱门形结构,索塔高度为130.39 m,下横梁兼做主梁0<sup>#</sup>块,采用C60混凝土,塔柱采用C50混凝土,采用液压爬模施工,桥塔合龙阶段,采用托架系统施工。桥塔平面布置及施工阶段划分如图1所示,全桥施工流程如表1所示。

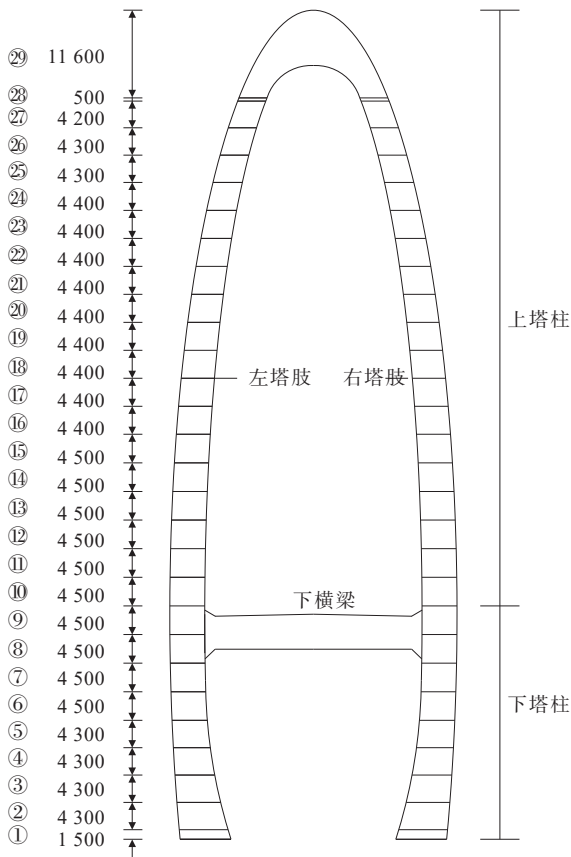


图1 桥塔平面布置及施工阶段划分图(单位:cm)

2 桥塔模型建立

采用有限元软件 Midas/Civil 建立拱形桥塔模型,并依据实际施工情况进行施工阶段模拟,桥塔模型如图2所示,模型共163个节点,165个单元。桥塔各结构均采用梁单元模拟,下横梁与塔柱采用共节点模拟两者固结,桥塔底部约束采用固结。桥塔2个塔肢采用C50混凝土,弹性模量为 $3.45 \times 10^4$  MPa,下横梁采用C60混凝土,弹性模量为 $3.60 \times 10^4$  MPa,混凝土强度均采用28 d龄期混凝土立方体抗压强度标

表1 全桥施工流程

| 施工阶段示意图 | 备注                                   |
|---------|--------------------------------------|
|         | 桥塔、交界墩施工                             |
|         | 主梁1 <sup>#</sup> ~2 <sup>#</sup> 块施工 |
|         | 主梁及对应斜拉索张拉施工                         |
|         | 主梁边跨合龙                               |
|         | 施工完成                                 |

图2 拱形桥塔建模示意图

准值。混凝土考虑收缩徐变,混凝土收缩徐变开始龄期为3 d,年相对湿度为70%,根据桥塔实际施工周期,定义施工阶段,每个桥塔号块施工周期为10 d。爬模、模板及临时结构等施工荷载共计1 300 kN,将其简化为节点荷载,施加在桥塔每个号块中间高度位置。

3 拱形桥塔线形、内力影响因素分析

3.1 温度影响

混凝土桥塔施工过程中,温度作用主要体现在两个方面<sup>[18-20]</sup>:① 体系温差(包括季节温差和昼夜温差);② 日照温差。体系温差作用下,按初始施工温度15℃,并分别考虑整体升温20℃,整体降温15℃,计算系统温度对桥塔线形及应力的影响,选取个别施工阶段进行分析,其中计算荷载为自重+施工荷

载+整体升降温,计算结果如表2所示。

表2 系统温度产生的桥塔变形及应力

| 施工阶段   | 系统升温  |        | 系统降温  |        |
|--------|-------|--------|-------|--------|
|        | 变形/mm | 应力/MPa | 变形/mm | 应力/MPa |
| 施工至⑤阶段 | 0.50  | —      | 0.38  | —      |
| 施工至⑨阶段 | 0.58  | —      | 0.43  | —      |
| 施工至⑯阶段 | 7.81  | 0.83   | 5.86  | 0.58   |
| 施工至㉓阶段 | 10.20 | 0.83   | 7.65  | 0.58   |
| 施工至㉔阶段 | 11.61 | 0.83   | 8.70  | 0.58   |
| 施工完成   | 5.28  | 0.88   | 3.96  | 0.61   |

由表2可知:在桥塔合龙前,随着桥塔施工高度的增加,系统温度对桥塔线形的影响逐渐增大。桥塔合龙后,两侧塔肢抗弯刚度增大,系统温度产生的桥塔变形减小。对于桥塔应力,在施工⑨阶段之前,即下横梁施工前,系统温度下,桥塔内外侧均无应力产生。下横梁施工后,由于下横梁在系统升降温作用下的伸缩效应,导致2个塔肢分别在其根部内侧和外侧出现拉应力,分别为0.83 MPa和0.58 MPa。桥塔合龙后,下塔柱内外侧应力值有所增大,分别为0.88 MPa和0.61 MPa。因此,桥塔合龙后,系统温度引起的塔肢拉应力增大。

当考虑桥塔日照温差时,由于拱形桥塔沿横桥向方向成曲线内倾式,桥塔横桥向变形及应力最难控制。因此,研究日照方向为横桥向时,桥塔内外侧温差对拱形桥塔的影响。假设日照方向如图3所示,左塔肢外侧受太阳直射,右塔肢内侧受太阳直射。由于桥塔施工过程中,日照温差的不确定性,分别考虑横桥向温度梯度2℃、4℃、6℃、8℃、10℃,进行温度梯度对桥塔线形及应力影响分析。

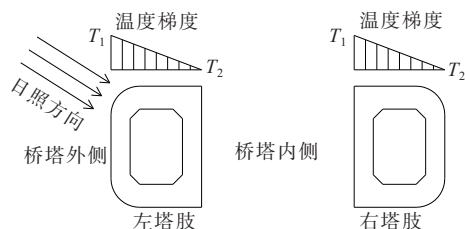


图3 桥塔日照方向及温度梯度分布

建立各温度梯度作用下的桥塔有限元模型,计算荷载为自重+施工荷载+温度梯度,提取桥塔各施工阶段塔肢最大位移。计算可知,桥塔两侧塔肢,在线性温度梯度作用下,两侧塔肢位移相同。因此,仅取左侧塔肢为研究对象,其位移情况如图4所示。

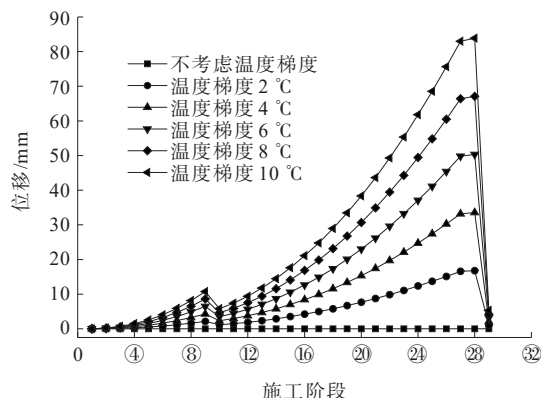


图4 温度梯度引起的左塔肢各施工阶段位移

由图4可知:各施工阶段温度梯度引起的塔肢最大位移随着温度梯度的增大而增大。同一温度梯度下,随着塔肢施工高度的增大,塔肢最大位移呈抛物线形增大变化。在塔柱浇筑⑩阶段、㉓阶段时,塔肢位移突然减小。其原因是下横梁的浇筑及桥塔的合龙,使两侧塔肢相互联系,彼此约束,横向抗弯刚度增大。因此温度梯度引起的桥塔横向位移大幅度减小。

对于桥塔应力,考虑温度梯度作用时,在下横梁浇筑前,两侧塔肢相互独立,线性温度梯度不会使塔肢产生拉应力。当下横梁施工完成后,由于下横梁约束作用,下塔柱将产生拉应力。因此,取下横梁施工后,桥塔应力为研究对象,分析桥塔应力变化规律。桥塔合龙前,各温度梯度产生的下塔柱最大拉应力如图5所示,桥塔合龙后,各温度梯度产生的桥塔最大拉应力如图6所示。

由图5、6可知:桥塔最大拉应力,随着温度梯度的增大成线性增大变化,温度梯度越大,桥塔拉应力越大。同一温度梯度作用下,桥塔合龙前和合龙后,左塔肢拉应力均大于右塔肢拉应力,其原因是塔肢截面横桥向方向不对称,其横截面上受拉和受压部分距中性轴最远距离 $y_t$ 和 $y_e$ 不相等,且 $y_t > y_e$ 。在左右两侧塔肢弯矩相等的情况下,左塔肢内侧拉应力

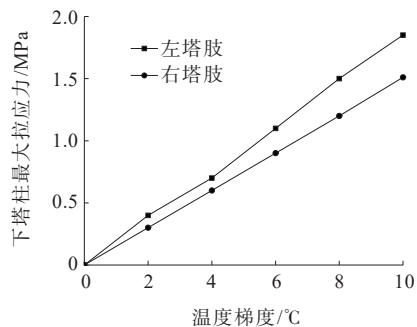


图5 合龙前温度梯度引起的下塔柱最大拉应力

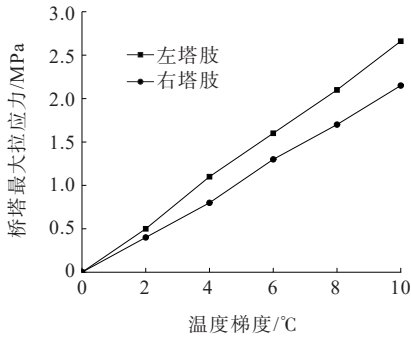


图6 合龙后温度梯度引起的桥塔最大拉应力

大于右塔肢外侧拉应力,数值模拟与理论变化规律相同,理论推导如下:

$$\sigma = \frac{My}{I_z} \tag{1}$$

式中: $\sigma$ 为横截面正应力; $M$ 为塔肢最大弯矩; $y$ 为所求应力点距中性轴的距离; $I_z$ 为横截面对中性轴 $Z$ 的惯性矩。

根据塔肢横截面形式可知,其塔肢内外侧边缘距截面中性轴的距离 $y_i > y_e$ ,将 $y_i$ 、 $y_e$ 分别代入式(1)中,可得:

$$\sigma_i = \frac{My_i}{I_z}, \sigma_e = \frac{My_e}{I_z} \tag{2}$$

所以 $\sigma_i > \sigma_e$ 。

式中: $y_i$ 为塔肢外侧边缘距截面中性轴的距离; $y_e$ 为塔肢内侧边缘距截面中性轴的距离; $\sigma_i$ 为左塔肢拉应力; $\sigma_e$ 为右塔肢拉应力。

3.2 风荷载影响

依托工程桥址所在地多年平均风速2.70 m/s,瞬时最大风速21.60 m/s。由于施工期间风荷载多瞬时作用在桥塔表面,在进行桥塔线形控制时,风荷载可不予考虑。在施工过程中,仅考虑风荷载对桥塔应力的影响。假设风荷载作用方向为横桥向,根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)<sup>[21]</sup>计算可知,作用在左塔肢上的静风荷载为9.30 kN/m,作用在右塔肢上的静风荷载为13.20 kN/m。风荷载作用平面图如图7所示,风荷载对塔肢应力的影响如图8所示,计算荷载为自重+施工荷载+风荷载。

由图8可知:各施工阶段,风荷载引起的塔肢拉应力,随着桥塔施工高度的增加而增大,左右塔肢施工到㉓阶段时,即桥塔施工完成后,两侧塔肢拉应力达到最大,拉应力大小分别为0.82 MPa、1.19 MPa。

3.3 压弯耦合效应影响

在拱形桥塔悬臂施工较高位置时,混凝土塔肢

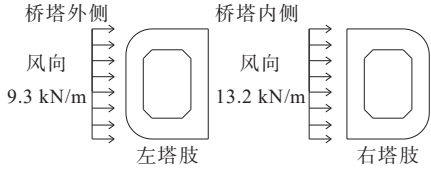


图7 风荷载作用平面图

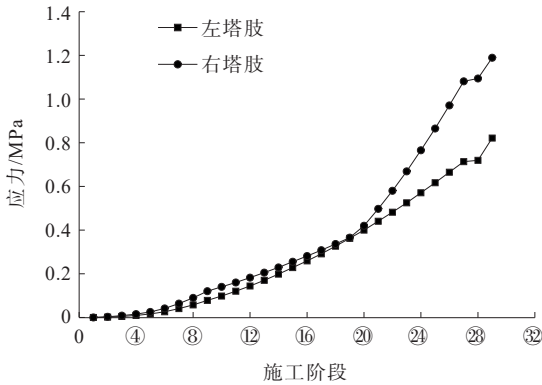


图8 各施工阶段风荷载引起的塔肢最大拉应力

可能产生压弯耦合效应,为分析拱形桥塔压弯耦合效应对塔肢线形及内力的影响,选取左塔肢的3个施工阶段(㉑阶段、㉒阶段、㉓阶段)为研究对象,考虑压弯耦合效应前后,塔肢端部位移及最大拉应力如表3所示,计算荷载为自重+施工荷载。

表3 考虑压弯耦合效应前后塔肢端部位移与最大拉应力

| 施工阶段 | 塔肢端部位移/mm |        |      | 塔肢最大拉应力/MPa |      |      |
|------|-----------|--------|------|-------------|------|------|
|      | 耦合前       | 耦合后    | 增量/% | 耦合前         | 耦合后  | 增量/% |
| ㉑阶段  | 38.33     | 38.60  | 0.7  | 0.38        | 0.39 | 2.6  |
| ㉒阶段  | 89.90     | 91.34  | 1.6  | 0.86        | 0.89 | 3.5  |
| ㉓阶段  | 181.54    | 186.34 | 2.6  | 2.10        | 2.21 | 5.2  |

由表3可知:不设置临时横撑时,随着塔肢悬臂施工高度的增大,混凝土拱形桥塔塔肢端部位移及拉应力,在考虑压弯耦合效应下均有所增大。塔肢在最大悬臂阶段即㉓施工阶段时,考虑压弯耦合效应后,位移增大了2.6%,增量较小;虽然塔肢最大拉应力增大了5.2%,但此时塔肢最大拉应力为2.21 MPa,超过了C50混凝土抗拉强度设计值1.83 MPa,实际工程中,需要设置临时横撑,保证桥塔施工安全。

在设置临时横撑后,拱形桥塔压弯耦合效应大幅度减小,以施工至㉓阶段为例,考虑压弯耦合效应前后,塔肢端部位移增量为0.2%,塔肢最大拉应力增量为0.5%,增量较小,无需考虑压弯耦合效应。因



此,混凝土拱形桥塔施工过程中,可根据桥塔是否设置临时横撑,确定是否考虑压弯耦合效应。

#### 4 临时横撑分析

通过上述温度、风荷载及压弯耦合效应对拱形桥塔线形、应力影响规律分析可知:在进行桥塔线形控制时,需考虑温度作用。在进行桥塔应力控制时,需同时考虑温度及风荷载作用。设置临时横撑时,可不考虑拱形桥塔压弯耦合效应。

为控制施工期间拱形桥塔线形,保证桥塔顺利合龙,避免混凝土开裂,根据设计要求可知,需控制塔柱轴线偏差小于 10 mm,塔肢最大拉应力小于 1.83 MPa(C50 混凝土抗拉强度设计值)。采用有限元软件 Midas/Civil 建立计算模型,从临时横撑设置、顶推力施加大小、横撑拆除顺序、桥塔预偏量等方面,进行拱形桥塔线形及应力控制研究。

计算荷载为:

桥塔线形计算荷载组合:自重+施工荷载+温度荷载

桥塔应力计算荷载组合:自重+施工荷载+温度荷载+风荷载

##### 4.1 临时横撑位置及数量分析

由于拱形桥塔塔肢成曲线内倾式,桥塔在未合龙前,在自重、施工荷载等作用下,塔肢会产生较大变形,且根部位置出现较大拉应力,导致塔肢发生开裂,降低桥塔寿命,减小桥塔强度。为减小桥塔施工高度过高时,塔肢变形过大,可通过在两侧塔肢之间设置横向临时横撑,减小塔肢变形。除此之外,由于临时横撑拆除后,将导致桥塔内力重分布,临时横撑不宜过多。因此需对拱形桥塔施工过程中,临时横撑位置及数量进行分析。

不考虑温度梯度时,以桥塔施工为例。在塔肢施工过程中,仅以塔肢拉应力不超过 1.83 MPa 为依据,确定横撑设置位置及数量。

当桥塔施工到②⑥阶段时,桥塔最大拉应力出现在①①阶段,应力值为 2.31 MPa。考虑爬模施工空间及桥塔施工安全性,可在③③阶段设置一道临时横撑。设置临时横撑后,塔肢最大拉应力为 1.54 MPa,满足规范要求。该情况下,桥塔施工完成后,塔肢轴线位移如图 9 所示。

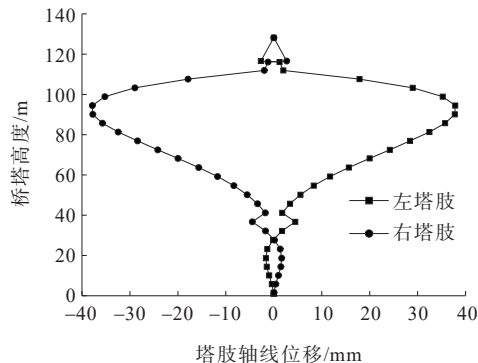


图 9 塔肢轴线位移

由图 9 可知:在不施加横撑顶推力的情况下,桥塔施工完成后,塔肢轴线最大位移出现在塔高 98.9 m 位置处,位移为 35.22 mm,其轴线位移较大,后续顶推力的施加也较难纠正,超过拱形桥塔线形控制精度,不满足施工设计要求。因此,本文除控制桥塔最大拉应力不超过 1.83 MPa 之外,同时需考虑桥塔设计要求中,塔肢轴线最大位移小于 10 mm,进行临时横撑位置及数量的确定。

桥塔施工到②①阶段时,塔肢轴线最大位移出现在①⑧阶段,位移为 12.38 mm,超过了 10 mm,此时,塔肢最大拉应力出现在中塔柱根部外侧,拉应力值为 0.47 MPa。考虑爬模施工空间及桥塔施工安全性,可在②④阶段施工完成后,在①⑧阶段位置处设置第一道临时横撑。当桥塔施工到②⑤阶段时,塔肢轴线最大位移出现在②③阶段,位移为 11.09 mm > 10 mm,此时,桥塔最大拉应力为 0.93 MPa。因此,可在②④阶段施工完成后,在②④阶段位置处设置第二道临时横撑。

第一、二道临时横撑均采用两根  $\phi 1\ 000\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  钢管,横撑之间水平间距为 3.0 m,钢管之间采用  $\phi 325\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  钢管连接。不考虑温度梯度时,左右塔肢轴线位移相同,以桥塔左塔肢线形为例,对比设置临时横撑与不设置临时横撑,桥塔施工完成后塔肢轴线位移,如图 10 所示。

由图 10 可知:临时横撑设置后,左塔肢轴线位移明显减小。横撑设置前,左塔肢轴线最大位移为 65.5 mm,横撑设置后,左塔肢轴线最大位移只有 4.29 mm,大大减小了桥塔线形偏差。

分析临时横撑的设置,对各施工阶段两侧塔肢应力的影响,各施工阶段塔肢最大拉应力如图 11 所示。

由图 11 可知:不设置临时横撑时,左塔肢与右塔肢最大拉应力均出现在浇筑②⑦阶段时,拉应力值分

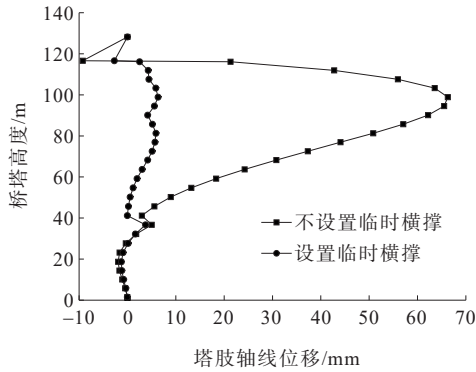


图10 左塔肢轴线位移

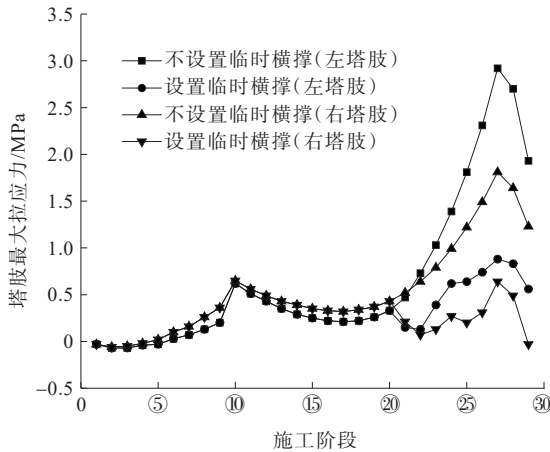


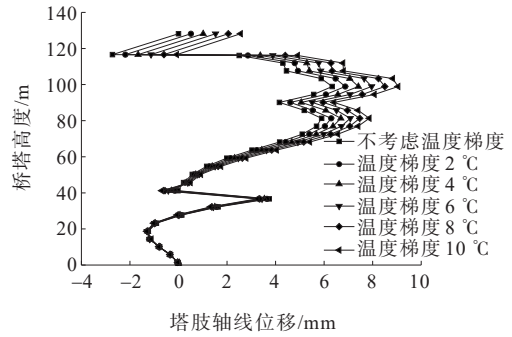
图11 各施工阶段塔肢最大拉应力

别为 2.92 MPa、1.81 MPa,左塔肢拉应力大于 1.83 MPa,超过了混凝土抗拉强度设计值。设置临时横撑后,左右塔肢最大拉应力也出现在浇筑⑳阶段,但拉应力值分别为 0.88 MPa、0.64 MPa,均小于 1.83 MPa。临时横撑设置后,塔肢最大拉应力明显减小。因此,临时横撑的设置,可以有效地减小桥塔施工过程中塔肢最大拉应力,避免混凝土开裂破坏。

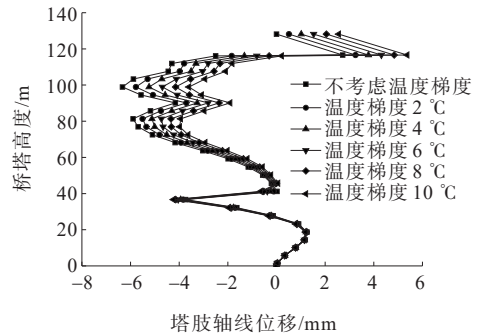
考虑温度作用,对比温度梯度 2℃、4℃、6℃、8℃、10℃情况下,设置临时横撑时,桥塔施工完成后塔肢轴线位移,分析温度梯度对拱形桥塔线形的影响。各温度梯度下,塔肢轴线位移对比如图 12 所示。

由图 12 可知:考虑温度作用时,由于拱形桥塔成曲线内倾式,在荷载组合作用下,左右塔肢轴线位移有所不同。并且随着温度梯度的升高,左塔肢轴线位移不断增大,右塔肢轴线位移不断减小。桥塔越高,温度梯度的影响越大。

为分析温度梯度对桥塔最大拉应力的影响,对比各温度梯度下各施工阶段塔肢最大拉应力,如图 13 所示。

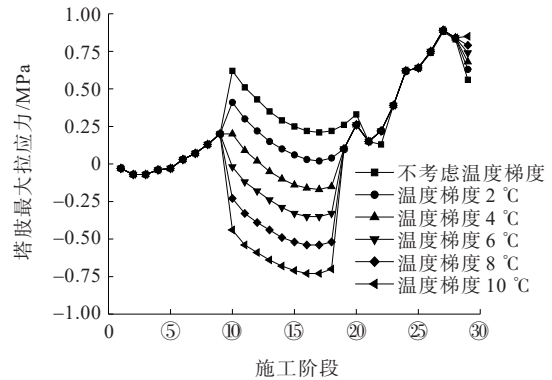


(a) 左塔肢轴线位移

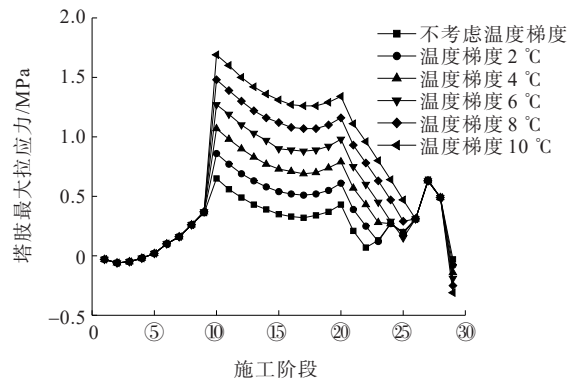


(b) 右塔肢轴线位移

图12 不同温度梯度塔肢轴线位移



(a) 左塔肢最大拉应力



(b) 右塔肢最大拉应力

图13 各施工阶段塔肢最大拉应力

由图 13 可知:考虑温度作用时,在施工⑩~⑮阶段时(桥塔下横梁至第一道临时横撑),随着温度梯度的增大,左塔肢拉应力逐渐减小,右塔肢最大拉应力不断增大。当在温度梯度为 $0\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在施工⑩~⑮阶段之间,左右塔肢最大拉应力趋近相同。

#### 4.2 横撑顶推力分析

上述研究表明:通过设置两道临时横撑,可以有效减小桥塔变形,并使桥塔最大位移控制在 $10\text{ mm}$ 以内。临时横撑的设置,也大大减小了施工过程中塔肢最大拉应力,使拉应力控制在混凝土抗拉强度设计值以内,避免了混凝土开裂,实现桥塔安全施工。为了进一步控制桥塔线形,可对横撑施加顶推力。

为实现横撑顶推力的精确模拟,临时横撑顶推力采用温度荷载进行模拟,可以准确地模拟施工中临时横撑内力变化,并反映钢管压缩变形对桥塔线形的影响<sup>[7]</sup>。

横撑顶推力的作用,主要是为了进一步减小桥塔轴线位移。因此,根据线形控制为主、应力控制为辅的原则,进行横撑顶推力的计算。在不考虑温度梯度的情况下,通过有限元模型计算可知,第一道临时横撑每根钢管施加顶推力 $550\text{ kN}$ ,总共施加 $1\,100\text{ kN}$ 。第二道临时横撑每根钢管施加顶推力 $240\text{ kN}$ ,总共施加 $480\text{ kN}$ 。通过顶推力的施加,在保证桥塔应力满足规范要求的前提下,成功使桥塔轴线位移控制在 $5\text{ mm}$ 以内。

不考虑温度作用时,桥塔施工完成后,塔肢轴线位移如图 14 所示,各施工阶段,塔肢最大拉应力如图 15 所示。

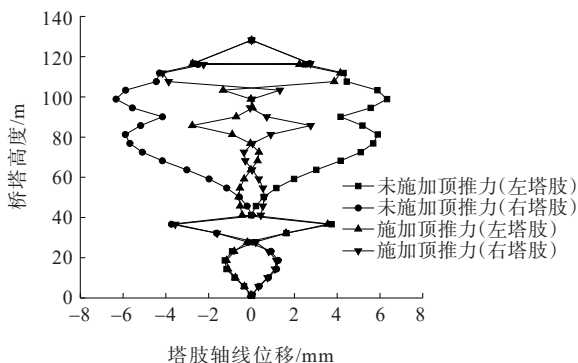


图 14 有无顶推力时塔肢轴线位移

由图 14 可知:顶推力的施加使两侧塔肢轴线偏差进一步减小,最终左右两侧塔肢,最大轴线位移仅

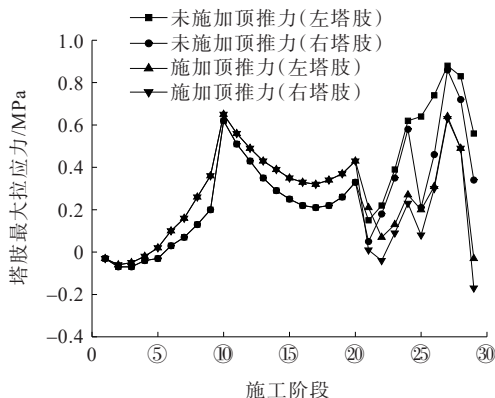


图 15 有无顶推力时各施工阶段塔肢最大拉应力

为 $4.15\text{ mm}$ 。由图 15 可知:横撑顶推力施加后,左右塔肢后续施工阶段,最大拉应力均有所减小。其中,左塔肢最大拉应力为 $0.85\text{ MPa}$ ,右塔肢最大拉应力为 $0.62\text{ MPa}$ 。

#### 4.3 临时横撑拆除设计

由于临时横撑的拆除,将对塔柱及剩余临时横撑内力进行重新分配,合理选择临时横撑的拆除顺序尤为重要。根据横撑设计可知,可分为两种拆除方案:①先拆除第一道临时横撑,后拆除第二道临时横撑;②先拆除第二道临时横撑,后拆除第一道临时横撑。两种横撑拆除顺序下,桥塔轴线位移偏差如图 16 所示。

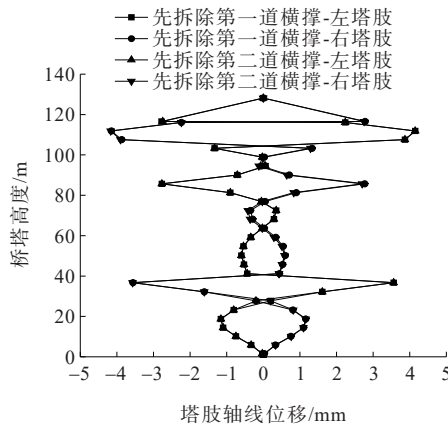


图 16 两种横撑拆除顺序塔肢轴线位移

由图 16 可知:临时横撑的拆除顺序对桥塔线形有少许影响,但影响较小,可忽略不计。并且通过计算可知:两种拆除方案,桥塔应力几乎没有变化。因此,当拱形桥塔设置两道横撑时,拆除临时横撑,可不用考虑其拆除顺序。

5 桥塔预偏量分析

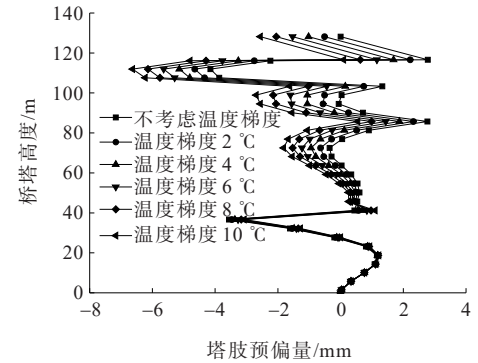
根据上述分析结果可知,临时横撑的设置及顶推力的施加,有效地减小了塔肢轴线位移,剩余塔肢线形偏差可通过提前设置桥塔预偏量进行消减,最终达到桥塔设计线形。各温度梯度下桥塔横桥向预偏量如图17所示。

由图17可知:温度梯度对桥塔预偏量有较大影响,随着温度梯度的增大,在施工下塔柱及下横梁时,温度梯度对塔肢预偏量影响较小;在施工上塔柱时,桥塔施工越高,温度梯度对两侧塔肢预偏量的影响越大。

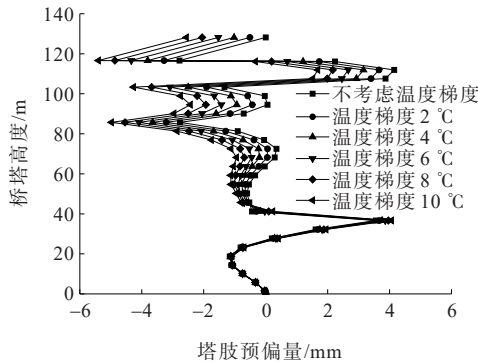
6 实测数据分析

选取桥塔个别施工阶段,对比桥塔悬臂端位移及塔底应力,现场实测值与理论值对比结果如表4所示。

由表4可知:剔除误差较大数据后,实测数据与理论数据较为吻合。在桥塔施工至⑨阶段、⑮阶段



(a) 左塔肢预偏量



(b) 右塔肢预偏量

图17 桥塔横桥向预偏量

表4 实测值与理论值对比结果

| 施工阶段           | 桥塔端部位移 |     |      |        |     |      | 塔肢底部应力  |       |      |         |       |      |
|----------------|--------|-----|------|--------|-----|------|---------|-------|------|---------|-------|------|
|                | 左塔肢/mm |     |      | 右塔肢/mm |     |      | 左塔肢/MPa |       |      | 右塔肢/MPa |       |      |
|                | 理论值    | 实测值 | 偏差/% | 理论值    | 实测值 | 偏差/% | 理论值     | 实测值   | 偏差/% | 理论值     | 实测值   | 偏差/% |
| 施工至⑤阶段(温度梯度0℃) | -0.11  | -3  | —    | 0.11   | 1   | —    | -0.46   | -0.48 | 4.30 | -0.46   | -0.48 | 4.3  |
| 施工至⑨阶段(温度梯度8℃) | 7.83   | 8   | 2.2  | 9.38   | 9   | 4.1  | -1.38   | -1.47 | 6.50 | -1.38   | -1.43 | 3.6  |
| 施工至⑰阶段(温度梯度0℃) | 1.70   | 9   | —    | 1.70   | 2   | 17.6 | -1.87   | -1.81 | 3.20 | -1.86   | -1.79 | 3.8  |
| 施工至⑳阶段(温度梯度0℃) | 1.10   | 1   | 9.1  | -1.10  | -1  | 9.1  | -2.14   | -2.09 | 2.30 | -2.14   | -2.09 | 2.3  |
| 施工至㉕阶段(温度梯度2℃) | 15.06  | 16  | 6.2  | 11.72  | 13  | 10.9 | -2.40   | -2.39 | 0.04 | -2.27   | -2.32 | 2.2  |

时,考虑数据采集时的桥塔温度效应,桥塔端部位移和塔肢底部应力的实际测量值,分别与温度梯度8℃、2℃作用下的理论值相吻合,因此温度梯度对桥塔端部位移及应力的影响不可忽略。桥塔施工至⑰阶段与⑳阶段时,由于在施工至㉕时,安装了临时横撑,并施加了横撑顶推力,桥塔端部位移有所减小。因此,临时横撑的设置可以有效减小桥塔轴线偏差。

7 结论

通过对某在建拱形桥塔斜拉桥桥塔线形及应力

控制措施及温度效应的研究,得出以下结论:

(1) 随着塔肢内外侧温度梯度的增大,温度梯度引起的桥塔变形不断增大。对于拱形桥塔,仅考虑温度梯度作用时,两侧塔肢变形相同,变形方向同日照方向,且在同一温度梯度下,随着塔肢施工高度的增大,塔肢最大位移呈抛物线形增大。在同一温度梯度下,两侧塔肢拉应力不同,外侧受日照的塔肢拉应力大于内侧受日照的塔肢拉应力。下横梁施工及桥塔合龙阶段,桥塔温度效应减小。

(2) 考虑温度作用时,由于拱形桥塔呈曲线内倾式,在荷载组合作用下,随着温度梯度的增大,外侧



受日照的塔肢轴线位移不断增大,内侧受日照的塔肢轴线位移不断减小。

(3) 对于拱形桥塔,需同时考虑桥塔线形及应力进行临时横撑的设计。临时横撑的设置、顶推力的施加、预偏量的设置,能够有效减小塔肢轴线位移及施工过程中塔肢最大拉应力,避免桥塔开裂。横撑顶推力施加后,可使桥塔轴线位移控制在 5 mm 以内。当设置两道横撑时,拆除临时横撑,可不用考虑拆除顺序。

(4) 实测数据与理论数据较为吻合,进一步验证了临时横撑的设置、顶推力的施加,可以有效减小桥塔轴线偏差,以及温度梯度对桥塔线形及应力的不可忽略的影响。

#### 参考文献:

- [1] 陈开桥,毛伟琦,王吉连.武汉大道金桥桥塔施工关键技术[J].世界桥梁,2012,40(1):19-23.
- [2] 姚亚东,徐佰顺,贾舒阳,等.甬江铁路特大桥施工控制[J].世界桥梁,2021,49(1):26-32.
- [3] 王树良.圆拱形斜拉桥桥塔超高支架稳定性分析[J].中外公路,2022,42(3):142-149.
- [4] 罗显平,翁方文,郑建新.大跨斜拉桥索塔施工及控制技术[J].公路,2017,62(5):86-90.
- [5] 杨志军,杨厚明.钢管临时横撑在斜塔柱施工中的应用[J].山东交通科技,2014(5):78-79.
- [6] 吕长荣,王岩.内倾式斜拉桥桥塔临时横撑施工方案优化应用研究[J].公路,2018,63(9):105-111.
- [7] 佟志峰,熊雷,刘小奇,等.单索面独斜塔斜拉桥桥塔施工关键设计参数影响研究[J].中外公路,2022,42(4):47-52.
- [8] 张丰,颜东煌,陈常松.大跨度组合梁斜拉桥成桥状态参数敏感性分析[J].交通科学与工程,2021,37(2):91-97.
- [9] 杨成洪,吴道优,向冠桦.水滴形多曲率超高斜拉桥索塔线形控制技术[J].施工技术,2020,49(3):33-36.
- [10] 赵全成,刘晓波,左小明.武汉青山长江公路大桥北塔临时横撑设计[J].桥梁建设,2020,50(S1):100-105.
- [11] 裴山,陈常松.嘉鱼长江公路大桥索塔应力及线形施工控制[J].中外公路,2020,40(3):146-150.
- [12] 杨智文,来晓理,黄飞鸿,等.斜拉桥拱形主塔施工过程分析与下横梁预应力张拉工序优化[J].中外公路,2020,40(2):78-81.
- [13] 易云焜.曲线形独塔无背索斜拉桥施工控制关键技术[J].桥梁建设,2018,48(2):116-120.
- [14] 史晶,梅秀道,金红岩,等.全飘浮体系斜拉桥 A 形混凝土桥塔施工控制[J].桥梁建设,2020,50(S1):119-125.
- [15] 柳鑫星,张雪松,刘殿元,等.拱形钢塔斜拉桥线形控制技术[J].公路,2013,58(4):36-39.
- [16] 唐振洪.益阳大桥温度影响分析[D].湘潭:湖南科技大学,2017.
- [17] 程东亚.江鱼型超高索塔力学性能及施工控制研究[D].长沙:长沙理工大学,2018.
- [18] 蒲黔辉,熊赳,王文东.高低塔斜拉桥施工阶段温度效应分析[J].桥梁建设,2018,48(5):21-26.
- [19] 江帆,吴超,张家玮.桥塔临时附着结构风致抖振响应时域分析[J].中外公路,2020,40(5):186-191.
- [20] 郑光琴,陈家勇,李岳,等.合川渠江景观大桥美学设计[J].中外公路,2023,43(3):146-149.
- [21] 同济大学.公路桥梁抗风设计规范:JTG/T 3360-01—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.