

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20221117001

文章编号: 1672-9331(2023)02-0146-11

引用格式: 丘燊, 蔡小杨, 李俊诺, 等. 厝角头索塔下塔柱施工及温度应力分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(2): 146-156.

Citation: QIU Shen, CAI Xiaoyang, LI Junnuo, et al. Construction and thermal stress analysis of the lower pylon of Cuojiatou cable tower[J]. J. Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(2): 146-156.

厝角头索塔下塔柱施工及温度应力分析

丘燊, 蔡小杨, 李俊诺, 王雷

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507)

摘要:【目的】分析厝角头造型索塔的施工及温度应力, 为该类索塔构造的设计施工积累经验。【方法】以主跨468.00 m的牛田洋大桥主桥为背景, 建立三维局部有限元模型, 采用静力分析和稳态热分析方法研究塔柱间板墩在不同施工方式及温度条件下的应力情况。【结果】板墩区域的受力主要取决于其浇筑成形后继续承受的荷载; 移动荷载在下塔柱中主要产生纵桥向弯矩、轴力及扭矩, 且纵桥向弯矩方向与恒载产生的弯矩方向相反, 这对板墩结构受力有利; 后浇带横向预应力可对板墩区域施加横桥向压力, 在施工分界位置存在应力集聚情况; 在下塔柱整体升降温条件下, 板墩肋板与底座相接处、板墩与下塔柱相接处存在拉应力。【结论】在下塔柱板墩区域设置后浇带时, 结构是安全的; 当下塔柱板墩区域一侧在日照下升温5~30℃时, 下塔柱拉应力均低于混凝土强度标准值2.74 MPa, 因此不会引起下塔柱混凝土开裂。

关键词: 斜拉桥; 厝角头造型; 下塔柱; 温度效应; 应力分布。

中图分类号: TU7

文献标志码: A

0 引言

索塔是斜拉桥最具表现力和象征意义的结构构件, 也是桥梁景观最重要的元素之一, 其造型对结构的美学效果起着至关重要的作用, 其结构形式也多种多样^[1-2]。但是, 外观优美的索塔往往伴随着索塔构造较为复杂的情况, 在部分结构受力不确定的情况下, 一般需进行受力分析^[3]。

针对斜拉桥不同造型索塔的受力特点, 已有研究人员进行了相关研究。廖光辉^[4]采用空间有限元软件对曲线花瓶形桥塔施工全过程的内力分布及应力进行了研究。何善晶^[5]基于空间有限元模型, 对水滴形索塔下塔柱和塔梁固结区的空间应力分布规律进行了研究。贺鹏等^[6]基于框架计算模型, 针对钻石形混凝土索塔下塔柱较短、下塔柱和下横梁受力不利的情况, 比选研究不同施工

方案对下横梁混凝土的影响。陈康明等^[7]以宁波外滩大桥索塔为研究对象, 分析了三角形斜塔结构的传力途径、受力性能、局部失稳机理和节段模型实际承载能力。张辉等^[8]对采用三根塔柱组成的空间异形混合索塔内各个部位结构的应力情况进行了分析。程建旗等^[9]以索塔为双耳瓷瓶轮廓异形结构的独塔桥梁为工程背景, 对恒载、汽车荷载、温度梯度作用下的索塔结构进行了计算。崔苗苗等^[10]对公铁两用跨海斜拉桥梭形索塔的整体静力、局部应力、稳定性及抗震性能进行了分析。为确定合理的索塔参数, 刘奇顺等^[11]对赤壁长江公路大桥索塔塔形及塔高进行了研究, 最终确定了H形塔以及桥面以上177.30 m塔高的方案。针对反对称空间弯扭曲线形钢塔施工困难问题, 孙亮^[12]采用数值分析方法研究了该类索塔的施工稳定性问题。佟志峰等^[13]选取“琵琶”形独斜塔斜拉桥索塔施工过程中支撑主动顶推力大小和角度、

收稿日期: 2022-10-21; 修回日期: 2022-11-29; 接受日期: 2022-12-02

基金项目: 交通运输行业重点科技项目(2018-MS1-007)

通信作者: 蔡小杨(1966—)(ORCID: 0000-0003-1637-1351), 男, 高级工程师, 主要从事桥梁工程方面的研究。

E-mail: caixiaoyang@ghdi.cn

主梁配重及拉索张拉力为结构参数,对施工过程中索塔及其支撑受力性能进行了研究。考虑温度效应,陈定市等^[14]采用自编程序计算了混凝土索塔在日照温度效应下的温度场和应力场。张宁等^[15]通过建立热传导计算模型,对高原高寒地区四季典型气候下索塔的温度场进行了研究。黄旭等^[16]则以西部横断山脉地区某大跨悬索桥为工程背景,开展了强降温气象条件下索塔温度效应及抗裂性能优化研究。

综上可知,目前,针对不同造型索塔在不同施工方式及温度荷载作用下的受力性能,学者们已开展了较为丰富的研究,但已有研究主要针对花瓶形^[4]、水滴形^[5]、钻石形^[6]、三角形^[7]、H形^[11]等索塔,对厝角头造型索塔研究较少。厝角头造型是以汕头民居五行山墙为文化原型,从中抽象设计出的索塔造型,具有整体造型圆润柔和的特点。为了解该类造型索塔在荷载及温度作用下的受力情况,本文以牛田洋大桥主桥为背景,建立索塔下塔柱局部有限元模型,分析塔柱间板墩在不同施

工方式及温度条件下的特点,为该类索塔构造的设计积累工程经验。

1 工程概况

牛田洋大桥主桥为双塔半漂浮体系公轨两用钢桁梁斜拉桥,其跨径布置为 $(77.50+166.10+468.00+166.10+77.50)$ m^[17],如图1所示。公轨分层布置,上层通行8车道公路交通,下层通行双线跨座式轨道交通。主梁为带副桁的板桁组合钢桁梁结构,空间三角形桁式,主桁架上层桥面宽38.20 m,下层桥面宽16.00 m,桁高11.70 m,标准节间长度15.10 m。边跨部分上层桥面采用混凝土桥面板,其余跨径部分上层桥面采用正交异性钢桥面板。斜拉索采用平行钢丝索,索塔基础采用大直径变截面钻孔灌注桩。该桥连通榕江南北两岸,中午阳光辐射最大时沿索塔塔柱截面短边方向直射,太阳光年均总辐射值约为1 500 kWh/m²,桥址处全年平均海水温度为18~28℃。

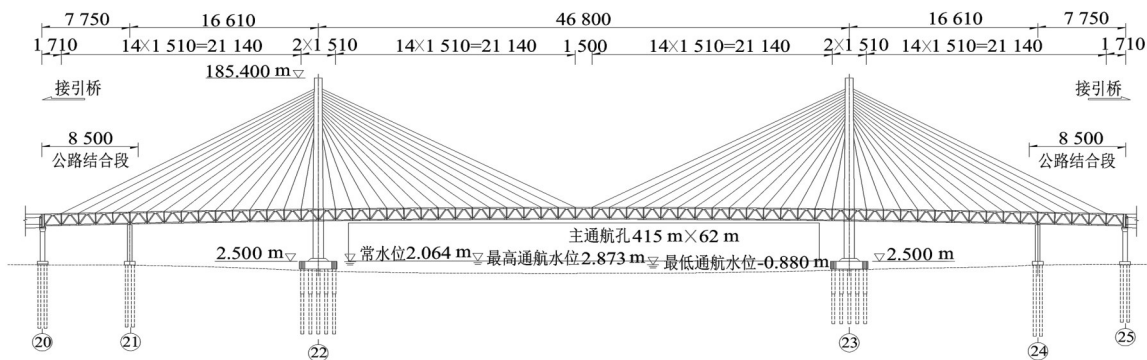


图1 牛田洋大桥主桥立面布置及横断面示意(单位:cm)

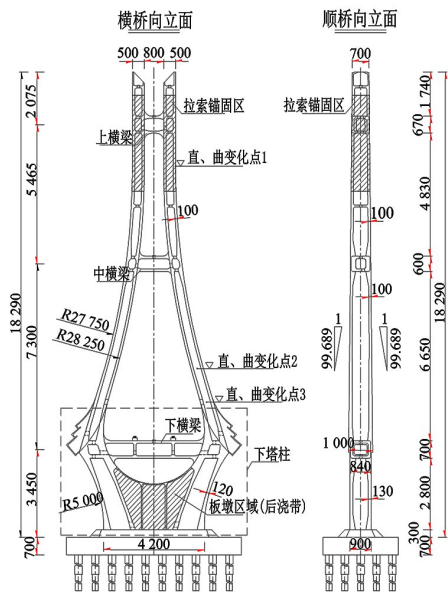
Fig. 1 Layout and cross section of the Niutianyang main bridge (unit:cm)

2 索塔构造

牛田洋大桥主桥索塔采用厝角头造型,主体为钢筋混凝土结构,塔柱全高182.90 m,上塔柱拉索锚固区内设置钢锚梁。塔柱间设上、中、下3道横梁,直、曲变化点3以下部分为下塔柱,以上部分为中、上塔柱,如图2所示。中、上塔柱轴线由上到下依次为直、圆、直的曲线组合,其中圆曲线半径为280.00 m。

索塔塔柱截面均为单箱单室截面。其中,上、中塔柱横桥向宽度在直、曲变化点2以上为5.00 m,经过直、曲变化点2后逐渐变宽,至下横梁中线位置处约为11.10 m;顺桥向宽度在塔顶处为7.00 m,以1:99.689坡度线性加宽至下横梁位置处为10.00 m。直、曲变化点2以上塔柱横桥向与顺桥向壁厚均为1.00 m,其以下逐渐加厚至横桥向1.20 m,顺桥向1.30 m。下塔柱顺桥向宽度为9.00 m,横桥向宽度由9.70 m过渡至12.30 m,外轮廓采用半径50.00 m的圆弧倒角。下塔柱最小壁厚为

1.20 m,横桥向两塔柱间通过壁厚60cm的板墩区域连接,并设置其为后浇带,该部分在钢桁梁合龙后施工,待后浇带施工完成后再施工桥面铺装及护栏等二期恒载结构。索塔横梁均为全预应力混凝土结构,单箱单室截面。其中,下横梁高度为7.00 m,宽度为8.40 m,壁厚为1.00 m。在钢桁梁支座支承处各设置1道板厚为0.85 m的横隔板。索塔构造及下塔柱施工情况如图2所示。



(a) 索塔构造示意图(单位:cm)



(b) 下塔柱施工情况

图2 索塔构造及下塔柱施工情况示意图

Fig. 2 Structure of pylon and construction of lower pylon column

3 有限元模型

采用通用有限元分析软件 ANSYS 建立索塔下塔柱的线弹性三维有限元模型。模型顶部采用 BEAM4 单元作为下塔柱内力加载过渡段,其截面特性按下塔柱截面计算,面积 A 为 29.50 m^2 ,抗扭惯矩 I_{yy} 为 249.0 m^4 ,顺桥向抗弯惯矩 I_{xx} 为 281.9 m^4 ,横桥向抗弯惯矩 I_{zz} 为 94.4 m^4 。桩基、承台及下塔柱等采用 SOLID45 单元模拟,预应力钢束采用 LINK8 单元模拟。参考相关文献,桩基长度取 5 倍桩径长度^[18-19],即 15 m。模型考虑下塔柱内腔的影响,但未考虑人洞及普通钢筋的影响。在模型下横梁上设置 $212\text{ cm}\times 260\text{ cm}\times 95\text{ cm}$ 的加载垫块,将钢桁梁支座集中力等效为均布荷载施加于垫块上。桩基采用 C35 混凝土,承台及底座采用 C40 混凝土,下塔柱采用 C55 混凝土,下横梁预应力采用 $25\phi^{*}15.2$ 钢绞线,后浇带预应力采用 $15\phi^{*}15.2$ 钢绞线,各部位材料参数如表 1 所示。

表1 模型各部位的材料参数

Table 1 Material parameters of each part of the model					
部件	单元类型	弹性模量/ MPa	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$)	泊松比	线膨胀系数/($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
桩基	SOLID45	3.15×10^4	2.60×10^3	0.2	1.0×10^{-5}
承台	SOLID45	3.25×10^4	2.60×10^3	0.2	1.0×10^{-5}
底座	SOLID45	3.25×10^4	2.60×10^3	0.2	1.0×10^{-5}
下塔柱	SOLID45	3.55×10^4	2.60×10^3	0.2	1.0×10^{-5}
加载垫板	SOLID45	21.00×10^4		0.2	1.0×10^{-5}
塔柱上部	BEAM4	3.55×10^4	2.60×10^3	0.2	1.0×10^{-5}
预应力钢束	LINK8	19.50×10^4	7.85×10^3	0.3	1.2×10^{-5}

索塔下塔柱上部 BEAM4 单元与下塔柱实体单元通过刚域连接,预应力钢束 LINK8 单元通过约束方程与下塔柱实体单元耦合,桩基底部采用固结约束。在索塔结构建造过程中,其几何形态、刚度及荷载与边界条件随施工进度不断变化,呈现出结构时变特性。因此,针对结构的组成部分与施工顺序,选择考虑以下 5 个对比工况。工况 1:二期荷载施加前后,下塔柱板墩区域设置后浇带与不设置后浇带对比(1.0 恒载);工况 2:下塔柱板墩区域设置后浇带与不设置后浇带对比(1.0 恒

载+1.0移动荷载,移动荷载考虑冲击、上下层及多车道加载);工况3:板墩区域不设置后浇带时,张拉下横梁预应力前后对比(1.0恒载);工况4:板墩区域设置后浇带时,张拉后浇带预应力对下塔柱的影响(1.0板墩区域预应力);工况5:板墩区域设置后浇带时,成桥后系统温度对下塔柱的影响(1.0恒载+1.0系统温度应力)。其中,板墩区域设置后浇带时施工过程为:①施工板墩区域1;②施工区域2及区域4,张拉下层后浇带预应力;③施工区域3及区域5,张拉中层后浇带预应力;④施工区域6,张拉上层后浇带预应力。板墩区域施工顺序示意如图3所示。有限元模型共划分1 263 904个单元,如图4所示。

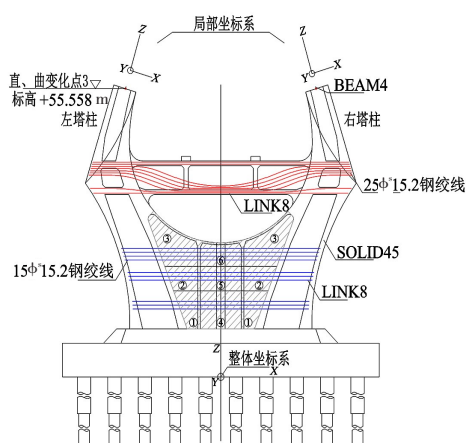


图3 索塔下塔柱有限元模型概况示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the finite element model of the lower pylon

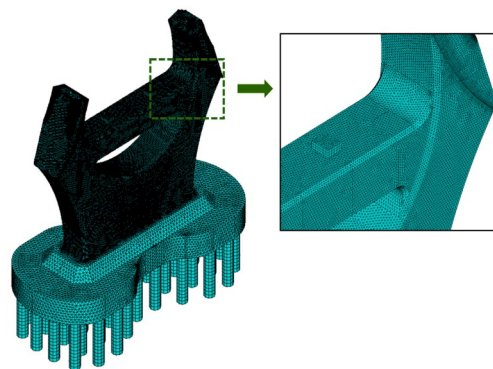


图4 索塔下塔柱有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the lower pylon of the tower

施加荷载包括自重、钢桁梁支座力、钢束预应力及下塔柱截面内力等,其中钢束预应力采用初应变的方式施加,不同工况的下塔柱截面内力及钢桁梁支座力从整体空间杆系模型中对应提取,各工况荷载情况如表2所示。

4 施工状态分析

4.1 工况1

当板墩区域设置后浇带时,在后浇带施工完成、二期荷载施加前,板墩区域横桥向正应力(σ_{xx})为-2.24~0.59 MPa,竖向正应力(σ_{zz})为-1.35~0.55 MPa。此时,塔柱中内力主要由下塔柱承担,而板墩区域仅承受其自重及预应力的作用,无较大应力产生。在二期荷载施加后,板墩区域 σ_{xx} 为-2.91~0.84 MPa, σ_{zz} 为-3.91~1.58 MPa,竖向拉

表2 各工况荷载情况

Table 2 Load condition of each working condition

工况		下塔柱内力						竖向支座反力/kN
		轴力/kN	横桥向剪力/kN	纵桥向剪力/kN	横桥向弯矩/(kN·m)	纵桥向弯矩/(kN·m)	扭矩/(kN·m)	
工况1	二期荷载施加前	-165 585	-10 138	-1 868	-187 116	-197 746	23 142	-1 684
	二期荷载施加后	-199 098	-11 423	-235	-212 832	-35 738	4 571	-5 182
工况2	移动荷载作用	-11 099	-407	851	-8 200	24 488	-3 080	-5 623
工况3	不设置后浇带且张拉下横梁预应力	张拉控制应力为1 395 MPa,考虑预应力损失后,下横梁预应力初应变为 6.245×10^{-3}						
工况4	设置后浇带并张拉后浇带预应力	张拉控制应力为1 395 MPa,考虑预应力损失后,后浇带预应力初应变为 6.009×10^{-3}						
工况5	系统升温(塔柱及底座+25 °C、承台+10 °C)	-6	8	-418	-588	49 979	-5 759	-219
	系统降温(塔柱及底座-25 °C、承台-20 °C)	6	-8	418	588	-49 979	5 759	219

注:图中塔柱内力正负号表示右塔柱局部坐标系中的方向,左塔柱内力与右塔柱的成正对称;支座反力方向为整体坐标系方向,如图3所示。

应力的增大主要来自纵桥向弯矩导致的一侧受拉,如图5所示。当板墩区域不设置后浇带时,在后浇带施工完成、二期荷载施加前,板墩区域 σ_{xx} 为 $-10.14\sim 1.43$ MPa, σ_{zz} 为 $-8.85\sim 1.53$ MPa。此时,

板墩区域需共同承受二期施工前后下塔柱内力及下横梁预应力产生的影响,横桥向受压为主。在施加二期荷载后,板墩区域 σ_{xx} 为 $-10.21\sim 1.10$ MPa, σ_{zz} 为 $-7.18\sim 1.17$ MPa,如图6所示。

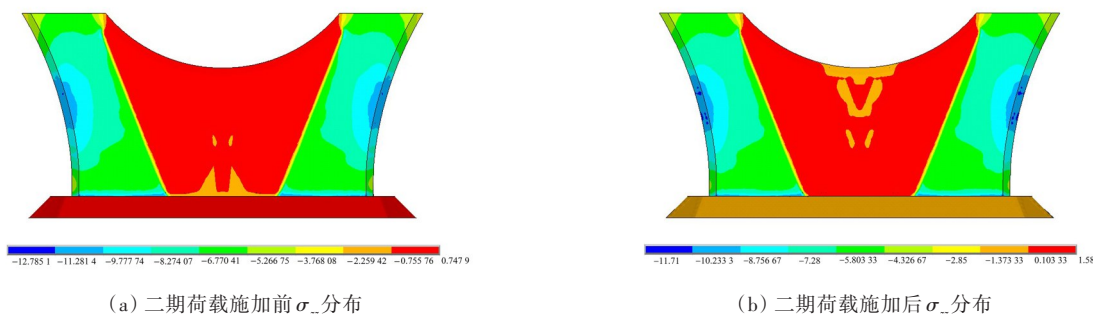


图5 施工阶段板墩区域设置后浇带时应力情况(单位:MPa)

Fig. 5 Stress condition when the post-pouring belt is set in the slab pier area during construction(unit:MPa)

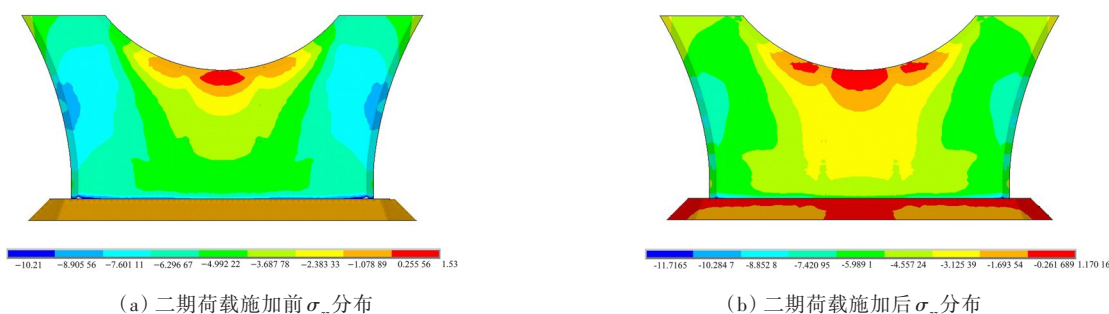


图6 施工阶段板墩区域不设置后浇带时应力情况(单位:MPa)

Fig. 6 Stress condition when no post-pouring belt is set in slab pier area during construction (unit:MPa)

4.2 工况2

当在板墩区域设置后浇带时,成桥后在移动荷载作用下,板墩区域 σ_{xx} 为 $-3.02\sim 0.78$ MPa, σ_{zz} 为 $-4.20\sim 1.24$ MPa。当板墩区域不设置后浇带时,成桥后在移动荷载作用下,板墩区域 σ_{xx} 为 $-10.06\sim 1.58$ MPa, σ_{zz} 为 $-7.24\sim 1.35$ MPa。此时,无论是否设置后浇带,移动荷载产生的影响均相同,下塔柱最终的内力状态为与前期施工累积的内力叠加得到,如图7所示。

4.3 工况3

当板墩区域不设置后浇带时,施工过程中张拉下横梁预应力后,纵桥向正应力(σ_{yy})的最大值为3.10 MPa,其主要为施工过程中张拉下横梁预应力对板墩区域顶板产生挤压作用,在板墩区域纵桥向顶板跨中底缘及纵桥向顶板边缘产生的较大拉应力,如图8所示。

在后浇带施工分界位置存在应力集聚情况,其中横桥向最大压应力在板墩区域后浇带5与6分界处,为 -1.78 MPa。中线处平均压应力为

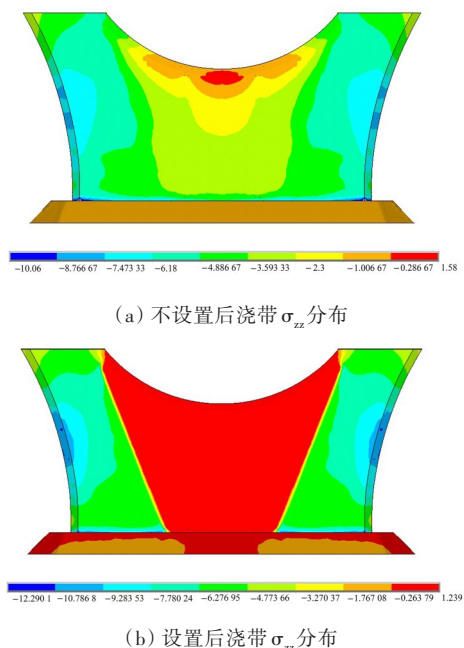
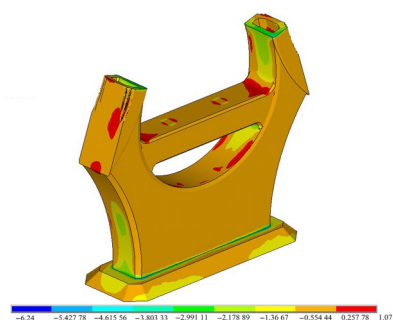


图7 桥墩区域受移动荷载作用时应力情况(单位:MPa)

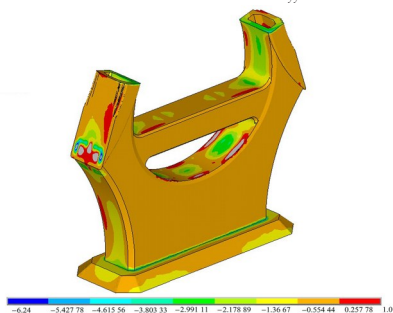
Fig. 7 Stress condition of pier area under moving load (unit:MPa)

-0.90 MPa。根据有效预应力计算结果,施加在板墩区域中线的名义应力为2.42 MPa,则有限元计算的平

均应力占比为37.0%,峰值应力占比为73.5%。



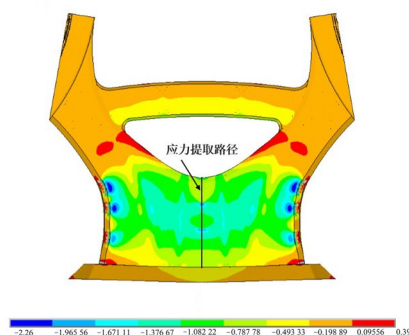
(a) 张拉下横梁预应力前 σ_{yy} 分布



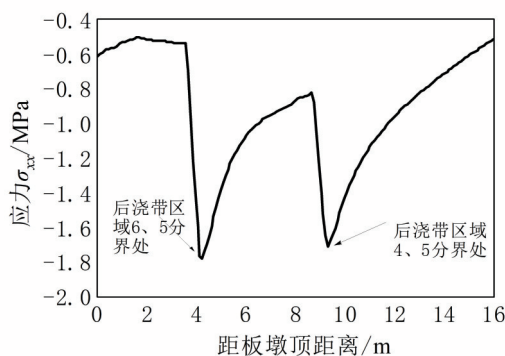
(b) 张拉下横梁预应力后 σ_{yy} 分布

图8 下横梁预应力张拉前后下塔柱应力情况(单位:MPa)

Fig. 8 Stress condition of lower tower column before and after prestressed tension of lower transverse beam(unit:MPa)



(a) σ_{xx}



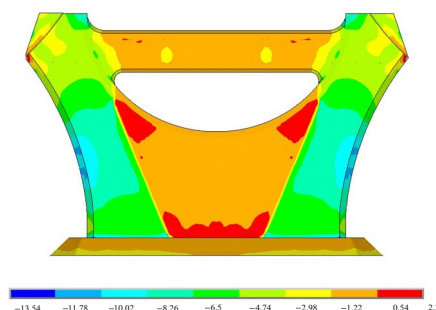
(b) 中线处 σ_{xx} 变化曲线

图9 仅后浇带预应力作用下下塔柱应力情况(单位:MPa)

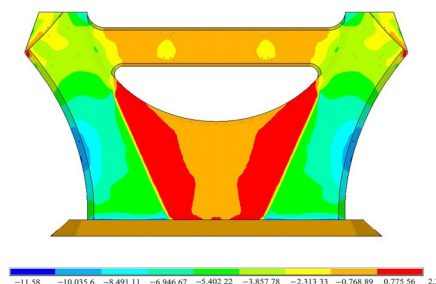
Fig. 9 Stress condition of tower column under the action of post-cast belt prestressing (unit:MPa)

4.4 工况5

当板墩区域设置后浇带时,成桥后系统升温作用下板墩区域 σ_{xx} 为 $-6.72\sim 0.40$ MPa, σ_{zz} 为 $-2.63\sim 2.30$ MPa,此时最大拉应力处为板墩肋板与底座相接处。成桥后系统降温作用下板墩区域 σ_{xx} 为 $-2.50\sim 1.34$ MPa, σ_{zz} 为 $-5.26\sim 2.32$ MPa,此时最大拉应力处为板墩与下塔柱相接处。在系统温度作用下,下塔柱拉应力数值均低于混凝土强度标准值2.74 MPa,如图10所示。根据上述工况计算结果,索塔下塔柱各应力情况如表3所示。



(a) 系统升温后 σ_{zz} 分布



(b) 系统降温后 σ_{zz} 分布

图10 系统温度作用下下塔柱应力情况(单位:MPa)

Fig. 10 Lower column stress under system temperature action(unit:MPa)

5 日照温度效应分析

从上文的分析结果可以看出,温度变化对下塔柱应力影响显著。为进一步分析温度的影响,本节考虑日照温差引起的温度应力。假设阳光直射板墩区域一侧,且认为温度与应力、变形不耦合,混凝土热物理性能不随温度变化。由于混凝土热传导性能较差,且温度梯度呈非线性分布,因此首先采用有限元稳态热分析计算稳定光照条件下由日辐射荷载引起的结构温度场温度梯度模式。然后,假设温度梯度模式沿墩高方向保持一

表3 索塔下塔柱各工况应力结果汇总表

Table 3 Summary of stress results of lower tower column under different working conditions

工况			板墩区域应力情况/MPa				
			横桥向正应力 σ_{xx}	纵桥向正应力 σ_{yy}	竖向正应力 σ_{zz}	最大主应力 σ_1	最小主应力 σ_3
1.后浇带张拉预应力影响	设置后浇带		-2.26~0.39	—	-0.64~0.63	0.78	-2.31
2.成桥过程中下塔柱设置后浇带与不设置后浇带对比	张拉下横梁预应力前	不设置	—	-2.73~1.07	—	1.89	—
	张拉下横梁预应力后	后浇带	—	-3.20~3.10	—	3.22	—
	二期荷载施加前(已张拉后浇带预应力)	设置后浇带	-2.24~0.59	—	-1.35~0.55	0.86	-2.30
		不设置后浇带	-10.14~1.43	—	-8.85~1.53	3.36	-10.56
	二期荷载施加后	设置后浇带	-2.91~0.84	—	-3.91~1.58	2.02	-4.37
		不设置后浇带	-10.21~1.10	—	-7.18~1.17	3.39	-10.26
3.成桥后下塔柱继续受移动荷载作用对比	设置后浇带		-3.02~0.78	—	-4.20~1.24	1.75	-4.72
	不设置后浇带		-10.06~1.58	—	-7.24~1.35	3.45	-10.33
4.设置后浇带成桥后受系统温度作用对比	系统升温		-6.72~0.40	—	-2.63~2.30	2.71	-6.76
	系统降温		-2.50~1.34	—	-5.26~2.32	3.39	-5.95

致^[20-23],选择关键截面做平面热分析,进而将截面的温度场转化为温度荷载施加到空间结构上以考虑日照温差对混凝土索塔的影响。基于上述分析方法,本节考虑光照一侧升温5~30℃,以5℃为间隔。图11给出了温差15℃时下塔柱板墩区域光照一侧和背光一侧的应力情况。

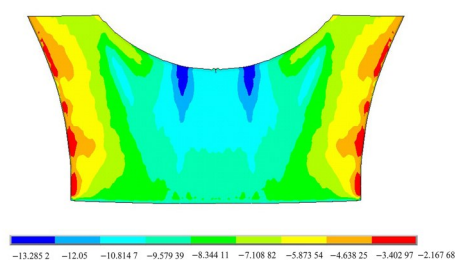
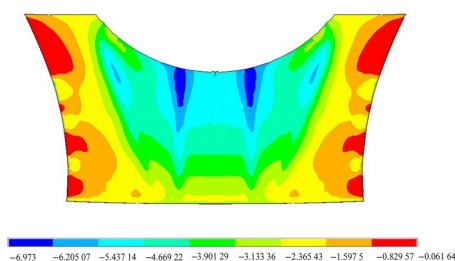
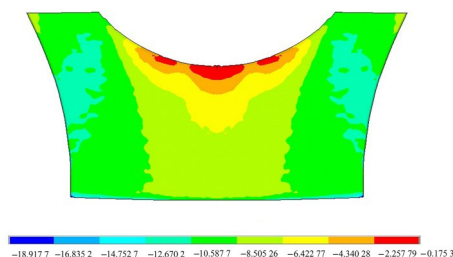
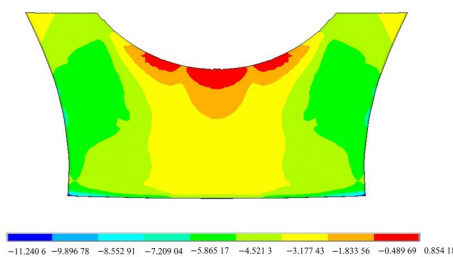
(a) 光照一侧 σ_{xx} 分布(b) 背光一侧 σ_{xx} 分布(c) 光照一侧 σ_{zz} 分布(d) 背光一侧 σ_{zz} 分布

图11 温差15℃时下塔柱板墩区域应力情况(单位:MPa)

Fig. 11 Regional stress of lower tower column at 15℃ temperature difference (unit:MPa)

从图11(a)和11(b)可以看出,受塔柱横向约束,中间板墩区域的压应力大于塔柱区域的,且光照一侧的压应力比背光一侧的大。从图11(c)和11(d)可以看出,塔柱区域光照一侧和背光一侧均

为压应力,板墩区域光照一侧为压应力,而背光一侧部分区域出现了拉应力,且板墩区域的压应力比下塔柱区域的小。这是因为塔柱区域需承受上部结构荷载,因此表现为压应力,而板墩区域竖向约束相对较弱。图12给出了下塔柱的 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 和最大主应力 σ_1 最大值随温差的变化规律。

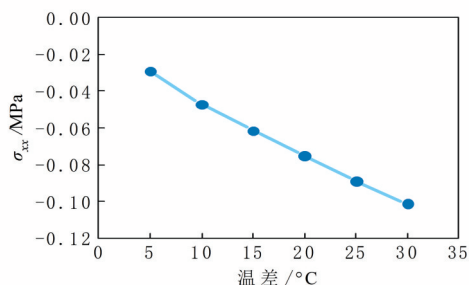
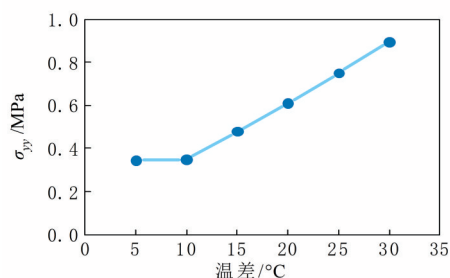
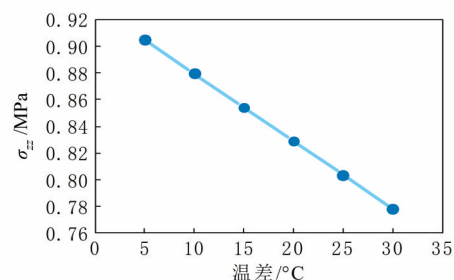
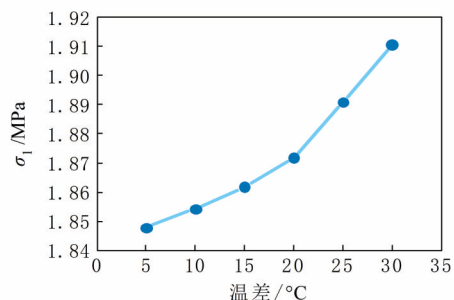
(a) σ_{xx} (b) σ_{yy} (c) σ_{zz} (d) σ_1

图12 下塔柱应力最大值随温差的变化规律

Fig. 12 Stress variation of lower tower column with temperature difference

从图12(a)可以看出,不同温差条件下 σ_{xx} 均表现为压应力,且随着温差的增大, σ_{xx} 呈近似线性增大趋势。温差为5℃时, σ_{xx} 为0.03 MPa,当温差增大至30℃时, σ_{xx} 增大至0.10 MPa。从图12(b)可以看出,不同温差条件下 σ_{yy} 均表现为拉应力。当温差在5~10℃时, σ_{yy} 变化较小;当温差在10~30℃时, σ_{yy} 表现出随温差增大而近似线性增大趋势。温差从5℃增大至30℃。从图12(c)可以看出,不同温差条件下 σ_{zz} 均表现为拉应力,且随着温差的增大, σ_{zz} 呈现近似线性降低的趋势。温差为5℃时, σ_{zz} 为0.90 MPa,当温差增大至30℃, σ_{zz} 增大至0.78 MPa,降幅较小。从图12(d)可以看出,不同温差条件下最大主应力 σ_1 均表现为拉应力,且随着温差的增大, σ_1 逐渐增大。当温差在15℃以内时,增速较缓,当温差大于15℃以后,增速加快。在本文考虑的5~30℃温差范围内, σ_1 增幅较小。同时,在本文考虑的温差范围内,下塔柱拉应力数值均低于混凝土强度标准值2.74 MPa,表明5~30℃日照温差不会引起下塔柱混凝土开裂。

6 结论

1) 牛田洋大桥主桥索塔下塔柱板墩区域设置后浇带时,施工过程中混凝土拉应力基本小于混凝土强度设计值2.74 MPa,结构受力是安全的。当不设置后浇带时,板墩区域较大的拉应力来源于塔柱下横梁预应力张拉导致的板墩顶部纵桥向应力。此时,板墩区域顶板为单向板,横向挤压将导致顶板强迫下挠变形产生较大拉应力,顶板存在开裂的风险。

2) 在移动荷载作用下,竖向正应力 σ_{zz} 比移动荷载施加前下降22%,压应力增大7%;横桥向正应力 σ_{xx} 比移动荷载施加前下降7%,压应力增大4%。移动荷载在下塔柱中主要产生纵桥向弯矩、轴力及扭矩,且其纵桥向弯矩方向与恒载产生的弯矩方向相反,对板墩结构受力有利。同时由于下塔柱下横梁的存在,移动荷载在横桥向对板墩区域的影响较小。

3) 在系统升温作用下,下塔柱受热膨胀,板墩区域底部产生横桥向的压应力,板墩肋板与底座相接处产生竖向拉应力。在系统降温作用下,下

塔柱受冷收缩,板墩区域底部产生较大的横桥向拉应力,板墩区域与下塔柱相接处产生较大的竖向拉应力。因此,在板墩后浇带施工时,应注意当时的环境温度,宜在低于年平均温度时施工,以避免成桥运营后在环境温度下降时板墩出现温缩裂缝。

4) 当下塔柱板墩区域一侧日照升温 $5\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其中 σ_{xx} 、 σ_{zz} 和最大主应力 σ_1 均表现出随温差增大而增大的趋势,而纵桥向正应力 σ_{yy} 最大值呈现出随温差增大而减小的趋势。在本文考虑的温差范围内,下塔柱拉应力数值均低于混凝土强度标准值 2.74 MPa ,表明 $5\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 日照温差不会引起下塔柱混凝土开裂。

参考文献

- [1] 丁建明.跨越的风景:景观桥梁“四维”创新理念与实践[M].南京:东南大学出版社,2021:49.
DING Jianming. Across the landscape: the "four dimensions" of landscape bridge innovation concept and practice [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2021: 49.
- [2] 马亚飞,朱智轩,谭旭,等.不对称转体斜拉桥球铰应力分析及不平衡力矩计算[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(2): 88-97. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.009.
MA Yafei, ZHU Zhixuan, TAN Xu, et al. Stress analysis and unbalanced moment calculation of ball joint in asymmetric rotating cable-stayed bridge [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(2): 88-97. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.009.
- [3] 王宁.异形斜拉桥装配式钢拱塔仿真分析与施工控制研究[D].北京:北京交通大学,2019.
WANG Ning. Research on simulation analysis and construction control of special-shaped cable-stayed bridge with steel arch tower [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [4] 廖光辉.斜拉桥曲线花瓶形桥塔力学行为研究与优化[D].重庆:重庆交通大学,2018.
LIAO Guanghui. Study and optimization of the mechanical behavior of the cable-stayed bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [5] 何善品.阆中嘉陵江四桥水滴形索塔空间应力分析[D].重庆:重庆交通大学,2014.
HE Shanping. The analysis of the fourth Langzhong Jialing River bridge of water-drop pylon space stress [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [6] 贺鹏,王成启.嘉鱼长江公路大桥桥塔设计[J].桥梁建设, 2018, 48(4): 84-89.
HE Peng, WANG Chengqi. Design of pylons of Jiayu Changjiang River highway bridge [J]. Bridge Construction, 2018, 48(4): 84-89.
- [7] 陈康明,吴庆雄,黄汉辉.斜拉桥桥塔节段力学性能[J].交通运输工程学报, 2016, 16(5): 17-29. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2016.05.003.
CHEN Kangming, WU Qingxiong, HUANG Hanhui. Mechanical property of segmental tower of cable-stayed bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(5): 17-29. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2016.05.003.
- [8] 张辉,徐声亮.空间异形混合桥塔钢筋混凝土结合段有限元分析[J].城市道桥与防洪, 2017(4): 78-80, 87, 10-11. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyh.2017.04.023.
ZHANG Hui, XU Shengliang. Finite element analysis on steel-concrete composite segment of spatial hybrid bridge pylon [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2017(4): 78-80, 87, 10-11. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyh.2017.04.023.
- [9] 程建旗,陆春燕,雷波,等.单塔自锚式悬索桥异形桥塔设计[J].公路交通技术, 2019, 35(3): 66-72. DOI: 10.13607/j.cnki.gljt.2019.03.012.
CHENG Jianqi, LU Chunyan, LEI Bo, et al. Design of special-shaped tower of a single tower self-anchored suspension bridge [J]. Technology of Highway and Transport, 2019, 35(3): 66-72. DOI: 10.13607/j.cnki.gljt.2019.03.012.
- [10] 崔苗苗,刘振标,王鹏宇.甬舟铁路富翅门公铁两用跨海大桥桥塔设计[J].世界桥梁, 2020, 48(S1): 40-46.
CUI Miaomiao, LIU Zhenbiao, WANG Pengyu. Pylon design for fuchimen rail-cum-road sea-crossing bridge on Ningbo-Zhoushan railway [J]. World Bridges, 2020, 48(S1): 40-46.
- [11] 刘奇顺,张德平.赤壁长江公路大桥桥塔设计与分析[J].武汉理工大学学报, 2021, 43(11): 63-68. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2021.11.011.
LIU Qishun, ZHANG Deping. Bridge tower design and analysis of Chibi Yangtze River highway bridge [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2021, 43(11): 63-68. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2021.11.011.
- [12] 孙亮.空间弯扭曲线钢桥塔的设计与施工[J].城市道桥与防洪, 2022(2): 94-97, 113, 16. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyh.2022.02.027.
SUN Liang. Design and construction of spatial bending curve steel pylon [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(2): 94-97, 113, 16. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyh.2022.02.027.
- [13] 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. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.04.008.
- TONG Zhifeng, XIONG Lei, LIU Xiaoqi, et al. Study on key design parameters of the constructional safety of the leaning single-tower cable-stayed bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(4): 47-52. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.04.008.
- [14] 陈定市,胡大琳,胡伟.混凝土桥塔日照温度效应分析[J].兰州理工大学学报,2016,42(3):143-149. DOI:10.13295/j.cnki.jlut.2016.03.029.
- CHEN Dingshi, HU Dalin, HU Wei. Analysis of sunshine temperature effect of concrete bridge tower[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(3): 143-149. DOI: 10.13295/j.cnki.jlut.2016.03.029.
- [15] 张宁,刘永健,刘江,等.高原高寒地区H形混凝土桥塔日照温度效应[J].交通运输工程学报,2017,17(4):66-77.
- ZHANG Ning, LIU Yongjian, LIU Jiang, et al. Temperature effects of H-shaped concrete pylon in arctic-alpine plateau region[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4): 66-77.
- [16] 黄旭,朱金,李永乐,等.西部横断山区强降温气候条件下桥塔温度效应及抗裂性能优化研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(2):310-319,339. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.202111071.
- HUANG Xu, ZHU Jin, LI Yongle, et al. Study on thermal-induced effect and anti-crack performance optimization of bridge pylon under strong cooling weather conditions in hengduan mountain region of Western China[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2): 310-319, 339. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.202111071.
- [17] 杨钻,王雷,王景奇,等.牛田洋大桥主桥结构设计[J].桥梁建设,2021,51(6):1-8.
- YANG Zuan, WANG Lei, WANG Jingqi, et al. Structural design of main bridge of Niutianyang bridge[J]. Bridge Construction, 2021, 51(6): 1-8.
- [18] 刘伟岸,叶爱君,王斌斌.大跨度桥梁桩基抗震简化模式的分析与探讨[J].结构工程师,2007,23(1):51-55,90. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2007.01.012.
- LIU Weian, YE Aijun, WANG Binbin. Discussion on seismic simplified modes of pile foundation in long-span bridges[J]. Structural Engineers, 2007, 23(1): 51-55, 90. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2007.01.012.
- [19] 刘中田.桥梁桩基模拟的简化方法及应用[J].城市道桥与防洪,2013(2):47-50,7. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyf.2013.02.012.
- LIU Zhongtian. Simplifying method and application of bridge pile foundation simulation[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013(2): 47-50, 7. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyf.2013.02.012.
- [20] 杨美良,吕寻博,段志岳.山区空心薄壁高墩日照温度效应[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2015,12(2):29-36.
- YANG Meiliang, LYU Xunbo, DUAN Zhiyue. Sunshine temperature field of mountain hollow thin-walled high piers[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2015, 12(2): 29-36.
- [21] 刘诚诚,黄永杰,张根思,等.高海拔地区薄壁空心高墩日照温度效应[J].中外公路,2021,41(1):76-79. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.01.016.
- LIU Chengcheng, HUANG Yongjie, ZHANG Gensi, et al. Sunshine temperature effect of thin-walled hollow high pier in high altitude area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1): 76-79. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.01.016.
- [22] 张玉平,李思阳,杨胜江,等.基于概率分析运营阶段钢箱梁温度作用[J].交通科学与工程,2021,37(4):33-42. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.004.
- ZHANG Yuping, LI Siyang, YANG Shengjiang, et al. Temperature effect of steel box girder at operation stage based on probability analysis[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(4): 33-42. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.004.
- [23] 刘阳帆,钟扬,樊林杰,等.日照下波形钢腹板箱梁桥竖向温度分布研究[J].公路与汽运,2022(3):86-89,103. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.03.021.
- LIU Yangfan, ZHONG Yang, FAN Linjie, et al. Vertical temperature distribution of box girder bridge with corrugated steel webs under sunshine[J]. Highways & Automotive Applications, 2022(3): 86-89, 103. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.03.021.

Construction and thermal stress analysis of the lower pylon of Cuojiaotou cable tower

QIU Shen, CAI Xiaoyang, LI Junnuo, WANG Lei

(Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507, China)

Abstract: [Purposes] The stress characteristics of the Cuojiaotou style cable tower are analyzed to accumulate experience for the design and construction of this type of cable tower structure. [Methods] Taking the Niutianyang Bridge with a main span of 468.00 m as the background, this paper establishes a spatial local finite element model and uses the static analysis and steady-state thermal analysis methods to study the stress of slab piers between tower columns under different construction methods and temperature conditions. [Findings] The stress of the slab pier area mainly depends on the load that it continues to bear after casting. The moving load mainly produces the bending moment, axial force, and torque of longitudinal direction in the lower tower column. Moreover, the direction of the longitudinal bending moment is opposite to that of produced by the dead load, which is beneficial to the stress of the slab pier structure. The transverse prestress of the post-cast strip can exert transverse pressure on the slab pier area, and there is stress concentration at the construction boundary. Under the condition of overall temperature rise and decrease of the lower tower column, there are tensile stresses at the connection between the plate pier rib and the base, and the connection between the plate pier and the lower tower column. [Conclusions] The stress of the structure is safe when the post-cast strip is set in the slab pier area of the lower tower column. Considering a solar temperature rise of 5~30 °C at one side of the slab pier area of the lower tower column, the tensile stress value of the lower tower column is lower than the concrete standard strength value of 2.74 MPa. Hence, the concrete cracking of the lower tower column is not caused.

Key words: cable-stayed bridge; Cuojiaotou shape; lower pylon; temperature effect; stress distribution

Manuscript received: 2022-10-21; **revised:** 2022-11-29; **accepted:** 2022-12-02

Foundation item: Project (2018-MS1-007) supported by Key Scientific and Technological Projects in Transportation Industry

Corresponding author: CAI Xiaoyang (1966—) (ORCID: 0000-0003-1637-1351), male, senior engineer, research interest: bridge engineering. E-mail: caixiaoyang@ghdi.cn

(责任编辑:赵冰;校对:石月珍;英文编辑:栗森)