

常泰长江大桥 5 号墩索塔下塔柱施工关键技术*

黄甘乐^{1,2}, 吕昕睿^{1,3}, 孙南昌^{1,3}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040; 3. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 北京 100088)

[摘要] 常泰长江大桥主塔采用钢混混合空间钻石形构型, 结构复杂, 施工难度大。为了探究索塔下塔柱在施工过程中的结构性能, 采用 MIDAS/Civil 建立索塔有限元模型, 对下塔柱施工进行了分析。结果表明: 设置 2 道对拉杆能有效改善施工过程中塔肢根部拉应力; 横桥向支架断开有利于下横梁线形控制; 纵桥向下横梁对顶的有效顶推力、顶口相对位移与塔肢根部拉应力均呈线性关系; 下横梁支架最大拉应力 106MPa、最大压应力 125MPa; 现场实测结果表明施工方案安全可靠。

[关键词] 桥梁工程; 斜拉桥; 钻石形索塔; 下塔柱; 有限元分析; 施工技术

[中图分类号] U445.4 [文献标识码] A [文章编号]

Key Construction Technology of Lower Pylon of No.5 Pier of Changtai Yangtze River Bridge

HUANG Ganle^{1,2}, LÜ Xinrui^{1,3}, SUN Nanchang^{1,3}

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China; 2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan, Hubei 430040, China; 3. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: The main tower of Changtai Yangtze River Bridge adopts the steel-concrete mixed space diamond shape, the structure is complex and the construction is difficult. In order to explore the structural performance of the lower pylon during construction, the finite element model of the pylon was established by MIDAS/Civil software and the construction of the lower pylon was analyzed. The results show that setting two pull rod can improve the tensile stress at the root of the pylon during construction. The disconnection of the transverse bridge support is beneficial for its linear control of the lower crossbeam; The effective push force of the lower beam of the longitudinal bridge has a linear relationship with the relative displacement of the closing port and the tensile stress of the tower limb root. The maximum tensile stress of the bracket is 106MPa, and the maximum compressive stress is 125MPa; The on-site measurement results are in good agreement with the theoretical calculation results.

Keywords: bridges; cable stayed bridges; diamond-shaped pylon; lower pylon; finite element analysis; construction

0 引言

* 中交集团科技研发计划课题
(2020-ZJKJ-03)

[作者简介] 黄甘乐, 检测工程师, 工程师,
E-mail: 2535717787@qq.com

[收稿日期] 2023-09-07

斜拉桥作为一种应用广泛的桥型, 其桥塔也有着众多类型, 如倒 Y 形、H 形、A 形、钻石形等。随着斜拉桥跨度增加, 桥塔高度也随之增加, 桥塔的弯矩效应也快速增长, 单纯增加平面索塔尺寸会导致非主要受力

方向的开裂难以控制,因此,采取结构措施将1个塔肢拆分成2个,形成空间钻石形桥塔是一种更合理方式^[1,2]。

空间钻石形桥塔在下塔柱施工过程中,由于自重及施工荷载作用,在根部会产生较大拉应力,易造成开裂,影响使用寿命^[3-4],因此需通过设置对拉杆来控制^[5-7]。常规的索塔下横梁通常采用上下分层或整体浇筑方式^[8-9],空间索塔较平面索塔多出3道下横梁,若采用4道下横梁同步浇筑,施工难度大,因此需探索合理施工方式。本文以常泰长江大桥下塔柱施工为例,对下塔柱施工过程中的结构受力进行分析和优化。

1 工程概况

常泰长江大桥主航道桥(142+490+1176+490+142=2 440m)为双层钢桁梁斜拉桥。该桥采用钢混混合空间钻石形桥塔,主塔设计总高352m,分上、中、下塔柱3个区段,中、下塔柱采用钢筋混凝土结构。下塔柱高48.5m,单个塔肢为正八边形,倾斜角度为14.33°,外轮廓尺寸由下至上为13m×13m渐变至11m×11m,壁厚由下至上2.3~1.9m。下横梁位于下塔柱与中塔柱交界处,为单箱单室截面,其中横桥向下横梁高8m、宽7m,梁底曲线半径为126m,纵桥向下横梁跨中高6m、宽6m,梁底曲线半径为35.3m。在纵桥向及横桥向下横梁跨中均设置2m后浇带^[10]。

主塔下横梁支架承重结构采用钢立柱+型钢形式,如图1所示。纵、横向分别布置10根和16根钢立柱($\phi 1\ 200\times 14$),钢立柱底部锚固在承台上,侧边通过平联与塔肢连接,柱顶及牛腿上方设置卸荷块。钢立柱间通过平联($\phi 600\times 8$)及斜撑($\phi 600\times 8$)钢管连接。钢立柱顶部布置主横梁(2HN900×300型钢),塔肢包边主横梁布置在牛腿上。主横梁上布置HN900×300型钢作为纵梁,纵梁上铺设I25a分配梁,分配梁上方布置拱形模板桁架。

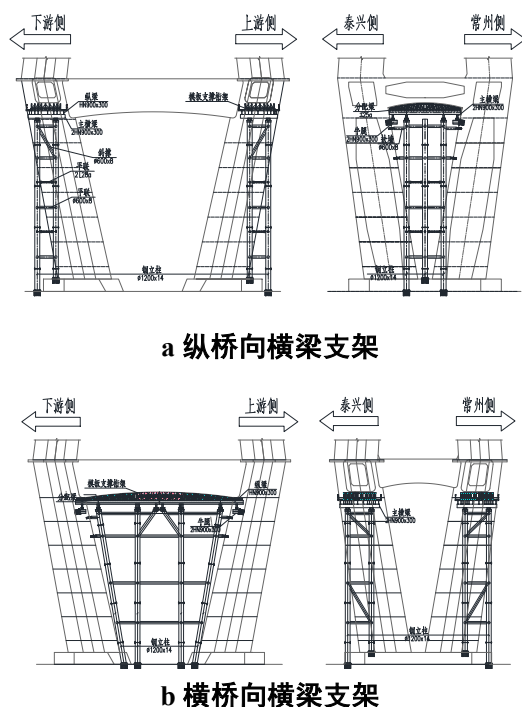


图1 下横梁支架及节段划分

Fig.1 Lower beam bracket and segment division

2 下横梁总体施工方案

2.1 下塔柱对拉施工工艺

5号墩索塔下塔柱划分为8个节段,其中1号节段(3m)与承台一起浇筑,其余各节段均高6m,8号节段与下横梁连接并一起浇筑。下塔柱2号节段采用模板施工,第3~7号节段采用液压爬模施工。由于下塔柱整体向外倾斜,在施工到一定高度后,需设置对拉杆以避免塔肢根部拉应力超限^[11]。塔肢在横桥向倾斜角度较大,因此在横桥向塔柱间分别设置2道对拉杆,第1道对拉设置在第4节间的+25.850m处,第2道对拉杆设置于第6节间的38.000m处。

2.1 下横梁与塔柱同步施工工艺

下横梁为支架现浇方式,将下横梁分为4个L形块,并预留4个合龙口,每个L形块竖向采用不分层一次性施工。具体施工工艺如图2所示。



图2 施工工艺流程

Fig.2 Construction process flow

3 数值模拟方法

下塔柱施工过程中采用 MIDAS Civil 进行建模计算分析,索塔及支架结构均采用梁单元模拟,对拉杆采用桁架单元,其中索塔采用 C60 混凝土,弹性模量取 $E=3.65 \times 10^4 \text{MPa}$,泊松比为 0.2;支架 Q235 钢弹性模量为 $2.1 \times 10^5 \text{MPa}$,泊松比为 0.3。荷载考虑结构自重,爬模按单肢 300t 加载,对拉杆拉力通过单元升降温控制。塔肢底部与支架底部采用固结,下横梁与支架体系间采用弹性连接。混凝土浇筑过程采用双单元法模拟,一层仅定义密度不定义弹性模量,用于模拟混凝土浇筑后还未形成强度时的结构受力状态;另一层仅定义弹模,在混凝土形成强度后激活。施工步骤如表 1 所示,下塔柱有限元模型如图 3 所示。

表 1 下塔柱施工步骤

Table 1 Construction steps of lower pylon

编号	工况
1~6	浇筑 1~6 号节段
7	25.850m 对拉杆张拉
8	浇筑 7 号节段
9	38.000m 对拉杆张拉
10	支架及拱架架设
11	浇筑 8 号节段①号 L 横梁

- 12 浇筑 8 号节段②号 L 横梁
- 13 浇筑 8 号节段③号 L 横梁
- 14 浇筑 8 号节段④号 L 横梁
- 15 张拉第 1 批纵梁预应力钢束
- 16 横桥向横梁后浇带浇筑
- 17 张拉第 1 批横梁预应力钢束
- 18 纵桥向横梁对顶
- 19 纵桥向横梁后浇带浇筑
- 20 张拉第 2 批纵梁预应力钢束
- 21 浇筑 9 号节段
- 22 张拉第 2 批横梁预应力钢束
- 23 拆除支架
- 24 张拉纵、横梁第 3 批预应力钢束
- 25 拆除下塔柱对拉

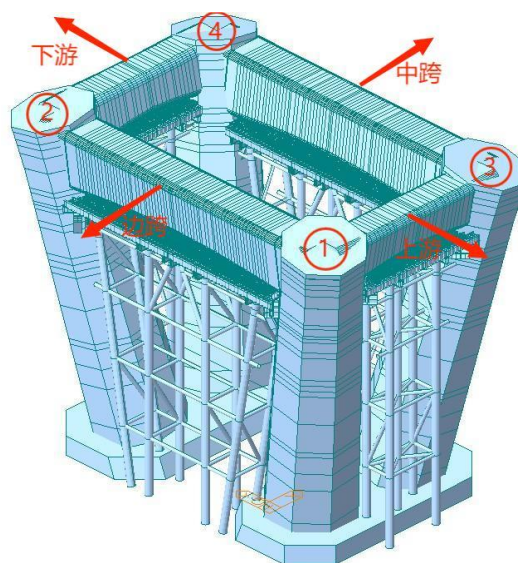


图3 下塔柱有限元模型

Fig.3 Finite element model of lower pylon

4 下塔柱施工分析

4.1 下塔柱对拉分析

下塔柱原对拉方案为在浇筑完 7 号节段后,在 38.000m 处设置对拉力为 15 000kN 的对拉杆,由于施加强对拉力前塔肢底拉应力最大值为 1.18MPa,大于控制值 1MPa。如调低对拉杆位置,则需施加更大对拉力,此时对拉局部处的混凝土应力难以满足要求,因此考虑在 25.850m 处再增设 1 道对拉杆。2 道对拉杆的控制原则如下:①25.850m 处对拉杆需保证施加强对拉力后塔肢底部拉应力 $< 1 \text{MPa}$;②38.000m 处对拉杆需与 25.850m 处对拉杆共同作用,保证施加强对拉力后塔肢底的受力状态与原方案计算结果保持一致;③保持 2 道对拉杆拉力相近以便预埋件设计。

由于塔肢间支架的存在,在考虑施工空间后,通过弯矩等效方式确定2道对拉杆的布置位置及对拉力大小,最终确定2道对拉杆在25.850m和38.000m处布置,对拉力分别为9600,9800kN。以1号塔肢应力变化为例,由图4可知,当不设置对拉杆时,随着施工节段增加,塔肢内侧拉应力逐渐增大,当施工完7号节段,塔肢内侧拉应力为1.18MPa,在整个施工过程中塔肢根部应力最大2.3MPa。当采用2道对拉杆时,在能降低浇筑完7号节段塔肢根部应力的同时保证其他施工阶段的受力状态与1道对拉杆方案相一致,且整个下塔柱施工过程中,下塔柱根部拉应力均 $\leq 1\text{MPa}$ 。

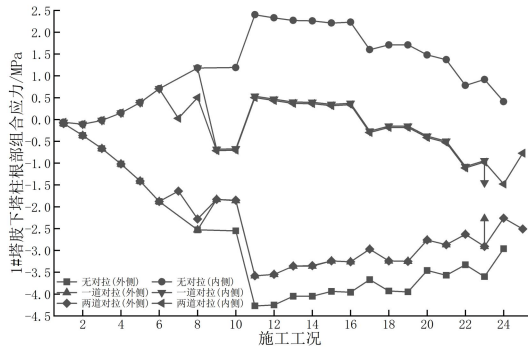


图4 1号塔肢下塔柱根部组合应力(单位:MPa)

Fig.4 Combined stress at the root of lower pylon of No.1 tower limb (unit:MPa)

由图5可知,25.850m处对拉杆对拉力在整个下塔柱施工过程中变化不大,38.000m处对拉杆仅在下横梁浇筑过程中有一定变化,最大变化量为40kN。

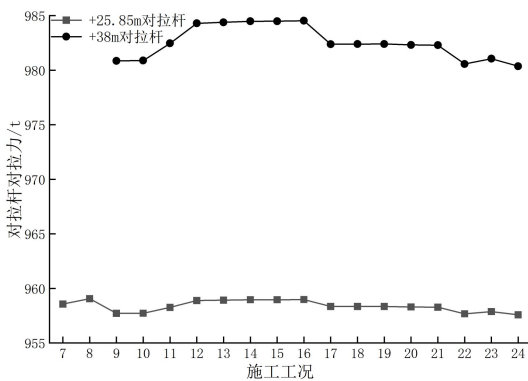


图5 下塔柱施工过程对拉杆被动对拉力
Fig.5 The passive tension of the pull rod in construction of the lower pylon

4.2 下横梁施工分析

4.2.1 方案比选

索塔下横梁通常采用索塔与下横梁同步施工或异步施工,采用不同施工方式会对结构的受力性能有不同影响,对于空间4塔肢索塔,结构整体性能尤为重要,以下对3种施工方案进行比较:①方案1,塔梁同步,按4个L块分别浇筑。②方案2,塔梁异步,先浇筑塔柱,再按方案1顺序浇筑下横梁。③方案3,塔梁异步,按边跨横梁→中跨横梁→下游横梁→上游横梁的顺序浇筑,其中上、下游横梁预留后浇带。

由表2可知,下塔柱施工完成后,方案2塔肢②,③绕横桥向弯矩远大于方案1,3;方案3绕横桥向弯矩远小于方案1,2。由表3可知,方案1与方案3在拆除对拉杆后塔肢根部应力相差不大,方案2塔肢②,③外侧压应力明显大于方案1,3。对于空间4塔肢索塔,结构整体性尤为重要,当采用异步施工时,塔柱与下横梁间存在新老结合面,会降低结构整体性,而塔梁异步施工在结构受力上无显著优势,因此方案1更合适。

表2 拆除对拉杆后塔肢根部弯矩

Table 2 Bending moment at the root of lower pylon after removing the pull rod (kN·m)

编号	方案1		方案2		方案3	
	M_x	M_y	M_x	M_y	M_x	M_y
①	78	203	58953	190546	26987	210577
	177	626				
②	79	204	78087	481027	18485	203582
	014	695				
③	43	208	37709	226976	18891	202515
	736	148				
④	44	208	33236	447744	10327	203673
	385	095				

备注: M_x 为绕纵桥向弯矩, M_y 为绕横桥向弯矩

表3 拆除对拉杆后塔肢根部应力

Table 3 Stress at the root of lower pylon after removing the pull rod MPa

编号	方案1		方案2		方案3	
	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧
①	—	—	—	-2.4	—	-2.4
	1.0	2.5	1.1	—	1.2	—
②	—	—	—	-3.4	—	-2.4
	1.0	2.5	1.3	—	1.3	—
③	—	—	—	-2.5	—	-2.3
	1.1	2.5	1.1	—	1.4	—
④	—	—	—	-3.5	—	-2.4
	1.1	2.5	0.7	—	1.3	—

4.2.2 支架形式

索塔下横梁有4道(见图3),体量较大,因此将其划分为4个L形块分别浇筑。传统

浇筑方式通常采用分层浇筑或整体浇筑^[12],荷载作用相对均匀。当采用分块浇筑时,先浇筑的下横梁作用在支架上后,支架内力增大,其几何刚度也随之增大,从而影响后浇筑的下横梁竖向变形,最终对下横梁整体线形造成影响。由于横桥向横梁跨度较大,分别对其支架跨中断开与不断开2种情况进行分析。横桥向下横梁支架如图6所示。

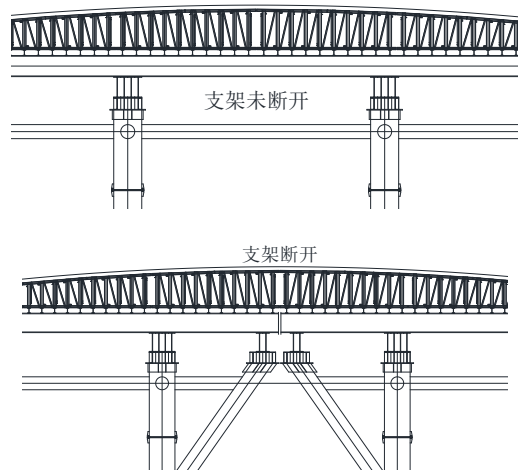


图6 横桥向下横梁支架示意

Fig.6 Bracket of the lower beam in the transverse direction

由表4和图7可知,当支架未断开时,纵桥向下横梁合龙口在合龙前存在明显高差,先浇筑侧比后浇筑侧低8.6mm,横桥向合龙口高差3.1mm。当横桥向支架断开时,合龙口无高差。支架跨中断开较不断开时的支架轴力最大值高100kN。下塔柱施工完成后,支架未断开时的下横梁竖向位移最大24.6mm,且关于跨中不对称,支架断开时的下横梁竖向位移最大23.8mm,且两侧对称。由上可知,支架是否断开对横桥向下横梁线形影响较大,对纵桥向下横梁影响相对较小,因此横桥向支架应采取主动断开,纵桥向支架可不断开,通过预拱修正。

表4 下横梁合龙口位移

Table 4 Displacement of closing port of lower beam					
支架 跨中 条件	合龙口竖向位移/mm				纵桥向 支架轴 力最大 值/kN
	横桥向横梁		纵桥向横梁		
	先浇 筑侧	后浇 筑侧	先浇 筑侧	后浇 筑侧	
	未断 开	—	—4.8	—	
断开	—	—	—	—	—5 867
	13.4	14.6			

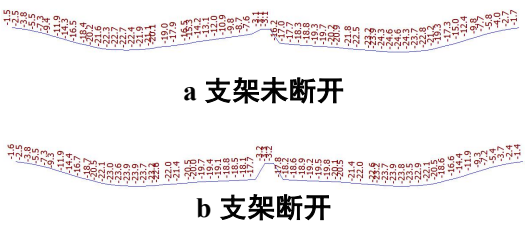


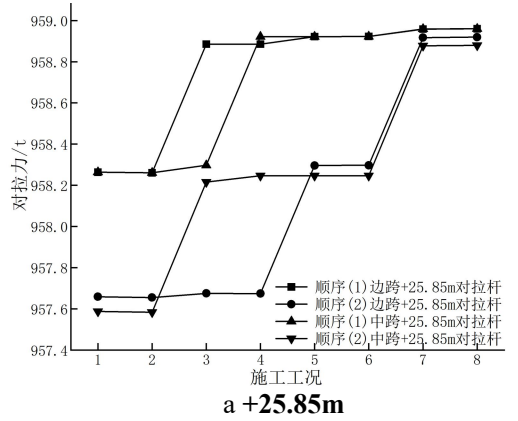
图7 下塔柱施工完成后横桥向下横梁竖向位移(单位: mm)

Fig.7 Vertical displacement of the lower beam in the transverse direction after construction of the lower pylon (unit:mm)

4.2.3 浇筑顺序

由于下横梁划分为4个L形块,其浇筑顺序对结构受力有一定影响,因此分别考虑2种浇筑顺序:①先浇筑边跨侧再浇筑中跨侧(①→②→③→④);②先浇筑上游侧再浇筑下游侧(①→③→②→④)。

由图8可知,在下横梁L形块浇筑过程中,对拉力呈现阶梯形变化,其中38.000m处对拉杆对拉力变化量最大,为40kN;25.850m处对拉杆最大变化量相对较小,最大10kN。采用顺序①的对拉杆对拉力在下横梁浇筑过程中大于采用顺序②的对拉杆,而在浇筑完成后相差较小。由表5可知,在下塔柱施工完成后,2种浇筑顺序下的塔肢根部弯矩差值较小。由以上分析可知,下横梁L形块浇筑顺序仅对结构施工过程中内力有影响,对施工完成后结构内力影响较小。



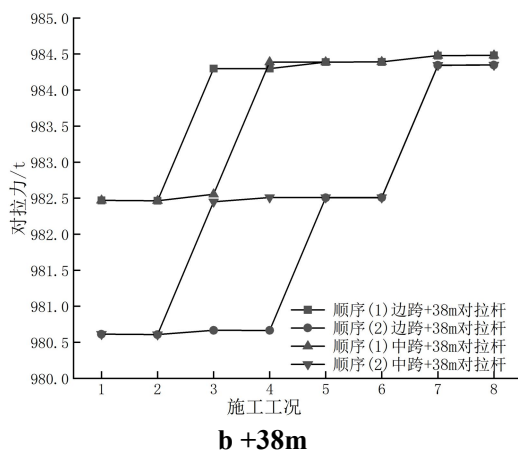


图 8 25.850, 38.000m 处对拉杆对拉力
Fig.8 Tension of pull rod at 25.850, 38.000m

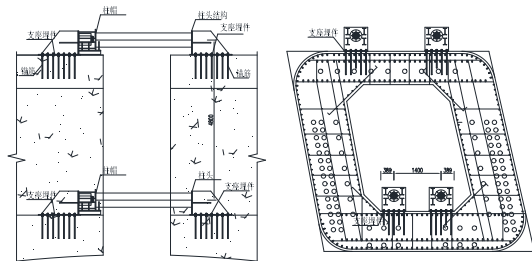
表 5 拆除对拉杆后塔肢根部弯矩

Table 5 Bending moment at the root of lower pylon after removing the pull rod (kN·m)

编 号	M_x		M_y	
	顺序①	顺序②	顺序①	顺序②
①	78 177	78 490	203 626	203 545
②	79 014	78 932	204 695	204 701
③	43 736	43 445	208 148	208 162
④	44 385	44 384	208 095	208 105

4.3 下横梁纵向合龙口顶推分析

为了改善下横梁后浇带混凝土因收缩、徐变及温度效应对塔肢根部产生的不利影响^[13-14], 需在合龙前采用多点低温顶推施工法进行顶推。合龙口设置 4 部顶推装置, 如图 9 所示。顶推过程中影响因素多, 难度大, 实际实施时需满足以下原则: ①为了保证有效对顶力, 需采取顶推力与顶推位移双控; ②需进行一定量超顶; ③满足边、中跨塔肢受力均衡, 上、下游对顶应保持同步; ④应选择低温稳定时段进行对顶施工, 并进行低温锁定^[15]。



a 正视

b 侧视

图 9 合龙口顶推结构示意图

Fig.9 Pushing structure at the closing port

由图 10 和图 11 可知, 有效顶推力与顶口相对位移和塔肢根部拉应力间基本呈线

性关系, 顶推力每增加 3 000kN, 顶口相对位移增加 0.7mm, 塔肢根部拉应力增加 0.03MPa。

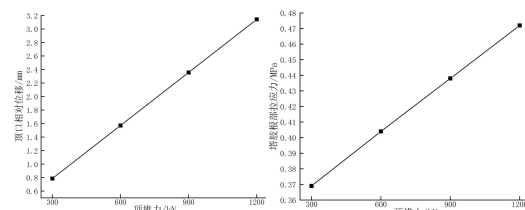
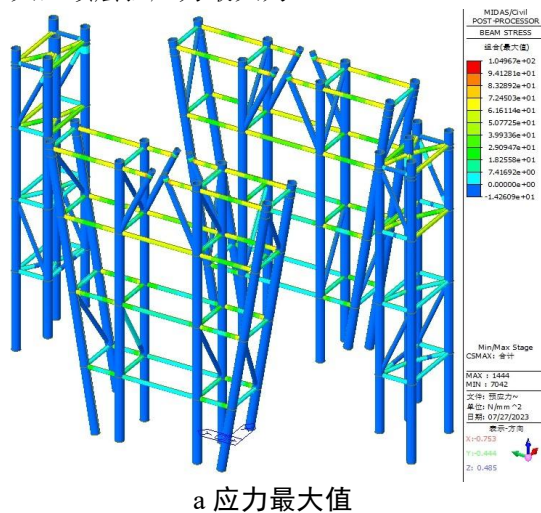


图 10 有效顶推力-合龙口相对位移
Fig.10 The effective push force-the relative displacement at the closing port

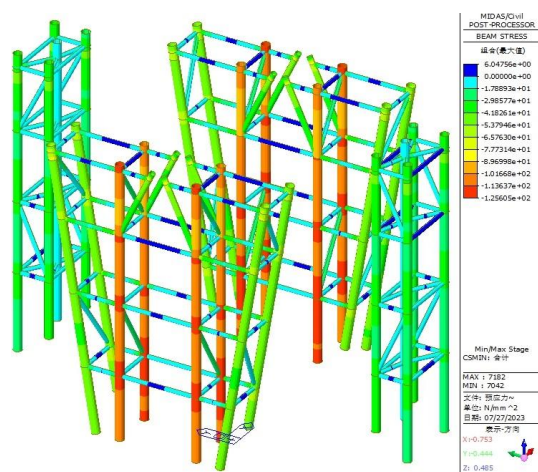
图 11 有效顶推力-塔肢根部拉应力
Fig.11 The effective push force - the tensile stress at the tower limb root

4.4 支架系统应力分析

由图 12 可知, 纵桥向支架的应力幅明显大于横桥向支架。在整个下横梁施工过程中, 钢立柱全部受压, 其中横桥向支架的直立柱压应力明显大于其他钢立柱, 压应力最大为 126MPa, 出现在后浇带混凝土浇筑完成后。平联在施工过程中主要表现为受拉, 且随着高度增加, 平联拉应力也在逐步增大, 顶层拉应力最大为 105MPa。



a 应力最大值



b 应力最小值
图 12 下横梁浇筑过程中应力最大、最小值
(单位: MPa)

Fig.12 The maximum and minimum stress in pouring process of the lower crossbeam(unit:MPa)

5 下横梁施工控制

5.1 下横梁浇筑施工

通过在 5 号墩支架立柱、斜撑、扶墙等关键结构部位的应力进行监测,支架共计 36 个测点,监测浇筑过程中支架应力变化。由表 4 可知,最大压应力出现在支架中间钢立柱,为 146.7MPa;斜撑最大应力为 102.4MPa,总体应力满足要求。

表 6 5#墩下横梁浇筑期支架应力监测结果

Table 6 Monitoring results of bracket stress during the pouring period of the crossbeam of No.5 pier MPa

位置	编号	1 号塔肢	2 号塔肢	3 号塔肢	4 号塔肢
下横梁支架	HL7	—	—	—	—
	HL8	129.1	116.3	110.3	99.0
	HL9	—	—	—	—
钢管立柱 (底部)	HL8	120.3	113.8	120.5	146.7
	HL9	116.9	105.4	79.2	85.6
	HL17	40.1	87.1	57.2	70.5
下横梁立柱 附墙	HL18	29.4	40.7	70.5	63.4
	HL25	—	—	—	—
	HL26	—	—	—	—
下横梁支架 钢管立柱 (上部)	HL25	88.0	99.2	113.1	50.5
	HL26	—	—	—	—
	HL26	52.2	102.4	55.9	45.9

下面以③号塔肢浇筑施工为例,由图 13 可知,支架应力在塔肢 3m 实心段时变化较

小,浇筑到横梁底板时支架应力逐步增大,浇筑到横梁腹板及顶板过程中支架应力增幅显著;支架应力范围略大于理论计算结果,变化较合理。

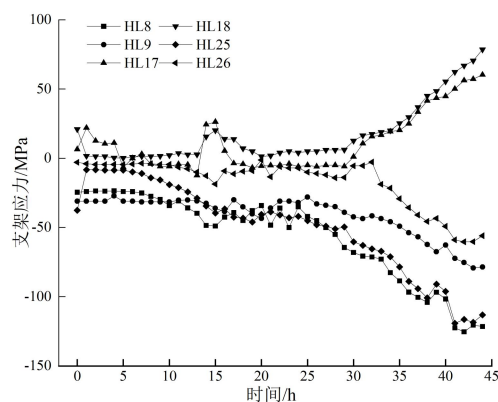


图 13 ③号下横梁浇筑期支架应力(单位: MPa)

Fig.13 Stress of the bracket during the pouring period of No.③ lower crossbeam (unit:MPa)

5.2 下横梁纵向合龙口顶推施工

合龙口顶推施工以位移控制为主、千斤顶顶推力控制为辅,采用磁致位移计进行监测。测点设置在纵向下横梁合龙口最前端,顶面中点位置和底面中点位置各 1 只,上、下游共 4 套纵向横梁。其中,上游顶板和底板顶推最终锁定位移分别为 2.060, 1.839mm,下游顶板和底板分别为 1.873, 1.874mm,单侧顶推 0.9mm(合龙口张开 1.8mm),对顶力为 6 850kN。

根据塔肢根部断面布置应力传感器,纵向横梁对顶施工完毕后,4 塔肢应力分别为 -1.16, -1.06, -1.00, -0.82MPa,未出现拉应力,说明下塔柱采用 2 道对拉杆等效 1 道对拉杆,能较好地控制塔肢根部应力。

6 结语

1)下塔柱设置 2 道对拉杆能较好地控制塔肢根部拉应力。

2)索塔与下横梁同步施工较异步施工更合适。

3)下横梁支架跨中是否断开对下横梁线形有一定影响。

4)L 形块浇筑顺序对结构内力影响较小。

5)纵桥向下横梁对顶的有效顶推力、顶

口相对位移和塔肢根部拉应力均呈线性关系。

6)现场实测数据结果良好,说明施工方案切实可行,所得经验可为同类桥塔施工提供参考。

参考文献:

[1]秦顺全,张金涛,陆勤丰,等.常泰长江大桥主航道桥桥塔方案研究[J].桥梁建设,2021,51(4): 1-9.

QIN S Q, ZHANG J T, LU Q F, et al. Research on pylon types for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge[J]. Bridge construction, 2021, 51(4):1-9.

[2]秦顺全,徐伟,陆勤丰,等.常泰长江大桥主航道桥总体设计与方案构思[J].桥梁建设,2020,50(3): 1-10.

QIN S Q, XU W, LU Q F, et al. Overall design and concept development for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge [J]. Bridge construction, 2020,50(3):1-10.

[3]孙百锋.倒 Y 型索塔下塔柱施工过程模拟与预张拉方案设计[J].铁道建筑技术,2017(8): 28-31.

SUN B F. Simulation and pre-tensioning scheme design on the construction process of lower column of inverted Y-type tower[J]. Railway construction technology, 2017(8):28-31.

[4]陈骑彪,刘孝辉,李琦.桥塔混凝土在施工工期变形荷载作用下开裂机理分析[J].公路交通技术,2008(6): 75-80.

CHEN Q B, LIU X H, LI Q. Analysis of cracking mechanism of bridge tower concrete under deformed load during construction[J]. Technology of highway and transport, 2008(6):75-80.

[5]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.

ZHAO Q C, LIU X B, ZUO X M. Design of temporary lateral bracings for north pylon of Qingshan Changjiang River HighwayBridge in Wuhan[J]. Bridge construction, 2020,50(S1):100-105.

[6]牛同辉,李怀剑,黄世长.斜拉桥 Y 型主塔上塔柱施工控制[J].四川建筑,2013,33(6): 196-198,200.

NIU T H, LI H J, HUANG S C. Construction control of upper tower columns on Y-shaped main tower of cable-stayed bridge[J]. Sichuan architecture, 2013,33(6):196-198,200.

[7]刘经熠.大型斜拉桥水中索塔建造的关键控制技术[J].上海公路,2020(2): 22-25,29,127.

LIU J Y. Key technologies of construction control of large cable-stayed bridge tower in water[J]. Shanghai highways, 2020(2):22-25,29,127.

[8]王汉章,曹振杰,兰晴朋.宜昌伍家岗长江大桥下横梁施工过程中内力分配模式研究[J].中外公路,2021,41(3): 135-140.

WANG H Z, CAO Z J, LAN Q P. Study on internal force distribution mode of lower crossbeam of Yichang Wujiagang Yangtze River Bridge during construction stages[J]. Journal of China & foreign highway, 2021,41(3):135-140.

[9]刘昀,颜东煌,涂光亚.大跨度斜拉桥桥塔下横梁安全施工方案研究[J].中外公路,2014,34(5): 105-109.

LIU Y, YAN D H, TU G Y. Research on the safety construction plan for the lower crossbeam of the tower of a long span cable-stayed bridge[J]. Journal of China & foreign highway, 2014,34(5):105-109.

[10]王文俊.邹城市上跨京沪铁路转体斜拉桥桥塔下塔柱选型研究[J].铁道建筑技术,2017(1): 62-65.

WANG W J. Study on selection of lower pylon column for rotational cable-stayed bridge crossing over Beijing-Shanghai Railway in Zoucheng[J]. Railway construction technology, 2017(1):62-65.

[11]张金涛,傅战工,秦顺全,等.常泰长江大桥主航道桥桥塔设计[J].桥梁建设,2022,52(5): 1-7.

ZHANG J T, FU Z G, QIN S Q, et al. Pylon design for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge[J]. Bridge construction, 2022,52(5):1-7.

[12]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.

CHENG D Y. Study on mechanical performance and construction control of Jiang Yu shaped super high pylon[D].Changsha:Changsha University of Science & Technology,2018.

[13] 周乐木,孙开武,殷源,等.棋盘洲长江公路大桥南塔下横梁施工关键技术[J].土木工程与管理学报,2019,36(6): 56-60.

ZHOU L M, SUN K W, YIN Y,et al. Lower cross beam construction technology of the south tower of Qipanzhou Yangtze River Highway Bridge[J]. Journal of civil engineering and management, 2019, 36(6):56-60.

[14]何善晶. 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 S J. Spatial stress analysis of drop-shaped cable tower of

Langzhong Jialing River Fourth Bridge[D].

Chongqing:Chongqing Jiaotong University, 2014.

[15] 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.

PEI S, CHEN C S. Construction control of pylon stress and geometry control of Jiayu Yantze River Highway Bridge[J]. Journal of China & foreign highway,2020,40(3):146-150.