

DOI: 10.7672/sgjs2025200042

超高空间异形钢斜塔施工关键技术*

曹利景^{1,2,3}, 巫兴发^{1,2,3}, 田 飞^{1,2,3}

(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. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040)

[摘要] 超高异形钢斜塔施工阶段的位移响应较大,对附墙结构受力产生不利影响;塔式起重机-钢塔联合体系的耦合作用可能削弱整体稳定性,特别是在风荷载或其他横向荷载作用下,更需引起注意。以某独塔双索面斜拉桥为工程背景,采用有限元软件建立塔式起重机-钢塔联合体系模型,研究空间异形钢斜塔塔式起重机附墙结构设计及其与钢塔联合作用下对结构体系受力的影响。研究表明,将常规双塔肢附墙杆改为单塔肢附墙杆,避免了附墙杆较长、受力角度不佳的不利状况,且塔式起重机垂直度满足规范要求;在静风荷载作用下,联合体系对钢塔位移及附墙受力影响不可忽略,其中塔式起重机引起的钢塔位移占比 20%~50%,附墙内力变化在 10%以内。

[关键词] 桥梁;钢斜塔;塔式起重机;线形;控制;有限元分析

[中图分类号] U445.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)20-0042-07

Key Construction Technology of Special-shaped Steel Inclined Tower in Ultra-high Space

CAO Lijing^{1,2,3}, WU Xingfa^{1,2,3}, TIAN Fei^{1,2,3}

(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. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: The displacement response of the ultra-high special-shaped steel inclined tower during the construction stage is large, which has an adverse effect on the stress of the attached wall structure. The coupling effect of the tower crane-steel tower combined system may weaken the overall stability, especially under wind load or other lateral load, which needs more attention. Taking a single tower double cable plan cable-stayed bridge as the engineering background, the finite element software is used to establish the tower crane-steel tower combined system model, and the structural design of the attached wall to the spatial special-shaped steel inclined tower crane and its influence on the stress of the structural system under the combined action with the steel tower are studied. The research shows that the conventional double-tower-limb attached wall pole is changed to a single-tower-limb attached wall pole, which avoids the unfavorable conditions of long attached wall pole and poor stress angle, and the verticality of tower crane meets the requirements of the code. Under the action of static wind load, the influence of the combined system on the displacement of the steel tower and the force of the attached wall can not be ignored. Among them, the displacement of the steel tower caused by the tower crane accounts for 20% to 50%, and the internal force of the attached wall changes within 10%.

Keywords: bridges; steel inclined tower; tower crane; linear; controlling; finite element analysis

* 中交集团揭榜挂帅项目:桥梁工业化智能建造关键技术研究与产业化示范(2021-ZJKJ-JBGS01)

[作者简介] 曹利景,工程师,E-mail: 1663643588@qq.com

[收稿日期] 2025-03-20

0 引言

钢塔斜拉桥因其良好的受力性能及优越的经济性被广泛应用于桥梁工程中。但由于其塔体高、自重等特点,建设阶段通常需采用重型塔式起重机配合吊装。近年来,关于塔式起重机附墙设计及施工已有较多研究^[1-3]。考虑塔式起重机附墙在施工过程中结构刚度及边界条件并未达到设计状态,为保证结构施工过程中的安全,本文针对塔式起重机临时附墙措施设计、半塔及整塔整体结构承载力、附墙处局部承载力、塔式起重机附着点水平位移等方面进行相关计算分析,在确保结构受力安全的前提下,为塔式起重机安装和使用提供理论支撑。

曲线钢塔斜拉桥实现了斜拉桥造型的突破,多用于城市景观桥梁的设计与建造。目前,国内外钢塔斜拉桥主塔结构形式有圆弧形钢斜塔和空间扭曲变截面钢塔,主塔架设方法多采用塔式起重机节段吊装或主塔整体竖转^[1]。竖转工艺在钢塔中已普遍应用,如太原迎宾桥钢塔采用卧式拼装、竖向转体的牵引竖向转体法施工,12h内完成竖转67.2°^[2];金婺大桥采用二次接力牵引竖转方案,52h完成2 530t钢塔90°竖转施工^[3];东苕溪大桥为斜拉-悬索组合体系,单个钢塔自重约1 200t,采用互拉式竖向转体施工方案^[4]。竖拼工艺在钢塔和钢混组合塔施工中应用较多,但多数研究及工程应用针对的钢塔形式较简单,如苏扬公路2号桥主塔高68.75m,塔轴线与竖直方向夹角为15°,采用钢塔无支架安装^[5];南京青奥公园步行桥采用椭圆形钢塔,倾斜35°,采用支架法施工^[6]。近年来,由于景观需要,异形钢塔数量逐渐增多,钢塔施工方案的选择对安装线形的控制影响较大。尤其对于超高空间异形钢塔斜拉桥,通常采用塔式起重机进行节段安装,塔式起重机-钢塔联合体系的相互作用会影响结构受力和变形^[7-10];汪仁威等^[11]研究了联合体系在工作状态及非工作状态下,塔式起重机对塔顶位移的影响占比分别约为20%,31.4%。因此,无论是在工作状态还是非工作状态下,塔式起重机对桥塔位移的影响均不宜忽略。

鉴于此,本文以某跨径布置为(45+185+238+45)m的独塔双索面斜拉桥为工程背景,在分析空间异形钢塔总体施工方案基础上,提出了关键临时结构设计,进一步研究了塔式起重机-钢塔联合体系对钢塔安装线形、附墙结构受力及塔式起重机垂直度的影响,为钢塔安装及塔式起重机使用提供理论支撑。

1 工程概况

拟建某城市景观主桥为独塔双索面斜拉桥,主跨238m,主梁与桥塔均采用钢结构。塔梁固结体系、斜拉索采用双索面布置,每个索面包含17对斜拉索,拉索按空间扭索面造型布置。主梁采用半封闭双边钢箱梁,中心线处高3.7m,标准断面宽64m,最宽处位于主塔塔梁段,宽度约87m;主塔为空间扭曲曲面钢桥塔,总高约173m,桥面以上钢塔高度约140m,立面倾斜角度为18°(见图1),采用六边形断面,截面高度、宽度均渐变,标准截面采用外筒加内筒形式,内筒为井字形。塔内横隔板标准布置间距3m,为实腹式隔板;在局部曲率较大部位,适当加密横隔板;桥面以上钢塔重7 040t,共划分为96个节段,最大节段重134.4t。

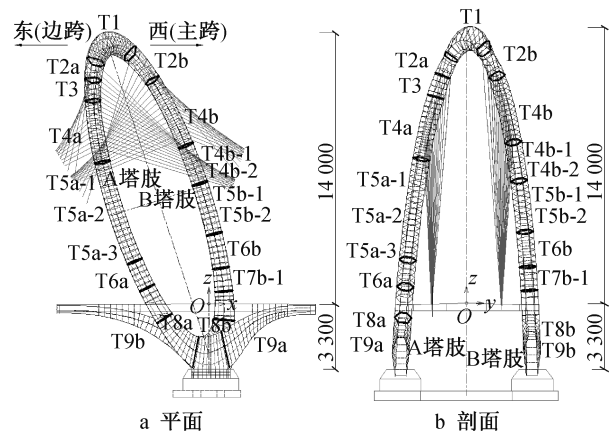


图1 钢塔结构设计(单位:cm)
Fig. 1 Design of steel tower structure(unit: cm)

2 总体施工方案分析

2.1 施工工艺

由于项目具有桥塔高、空间扭曲非对称、倾斜角度大等特点,采用整体竖转方案时,桥面以上钢塔总重约7 040t,转体荷载大,对转铰设计要求较高,且转动过程中索力变化幅度大,对钢绞线夹持锚固、同步性控制与设备可靠性要求高;采用竖拼方案时,在起吊设备选择方面,采用门式起重机提升架安装方案时,桥面以上钢塔高度约140m,架体高,规模大,受风荷载影响大,稳定性差,且安拆高空作业面及人员多,架体拆除难度极大。因此,推荐选用塔式起重机节段吊装方案。

为保证钢塔拼装过程中的线形,需设置相应临时措施。由于项目为空间异形非对称钢斜塔,且钢塔高,不宜采用全支架体系拼装,因此选用少支架+临时拉索+水平横撑组合体系,如图2所示。钢塔线形控制以临时拉索控制为主,支架和水平横撑控制为辅。

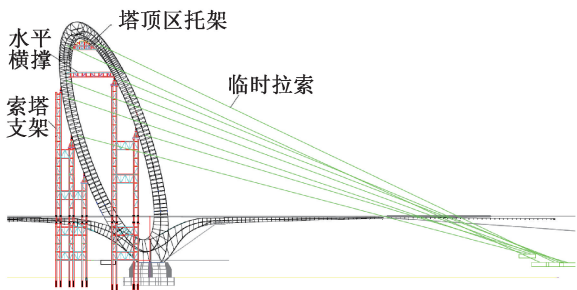


图 2 临时措施
Fig. 2 Temporary measures

2.2 施工重难点分析及对策

- 1) 钢塔钢结构节段为异形构造, 节段自重大, 安装控制难度大。采用塔式起重机安装时, 需开展塔式起重机选型分析及塔式起重机-钢塔联合体系吊装工况分析, 确保吊装作业安全。
- 2) 钢塔施工线形控制难度大。应对关键施工结构进行精细化建模, 模拟主塔安装施工工况, 根据结构全体系耦合受力计算分析, 优化临时结构设计, 解决钢塔安装过程中累积变形及合龙口相对变形问题, 降低合龙难度; 应用智能监控系统, 实时监测钢塔安装过程中永临结构力学和位移行为。
- 3) 附墙设计难度大, 施工风险高。由于钢塔为空间异形结构, 附墙与塔式起重机连接设计难度大, 且钢塔线形调整会对附墙受力产生影响, 需优化附墙布置位置及结构形式, 确保结构安全。

3 主要临时结构设计

- 1) 钢塔竖向拼装支架 (桥面以上部分)。上、下游塔肢拼装过程中共设置 5 组拼装支架, 由 $\phi 1\ 000\times 12$ 钢立柱、 $\phi 426\times 6$ 平联、2[32a 斜撑组成 5 组格构柱, 上、下游格构柱间分别采用平联桁架连接成整

体, 支架与钢塔采用 $\phi 630\times 12$ 附墙连接, 支架上设置支座垫块和千斤顶调位垫块。

- 2) 主动横撑。主动横撑以控制横桥向位移为主, 采用格构形式, 中心距桥面以上 100.04m, 高 3.8m, 总长度约 50m。横撑横杆采用 $\phi 800\times 12$ 钢管, 平联采用 $\phi 426\times 6$ 钢管, 斜撑采用 2[25 制作, 安装横撑前, 在钢塔上设置横撑牛腿, 在一侧牛腿上放置千斤顶, 在另一侧牛腿处抄垫并焊接固定。

- 3) 临时拉索。临时拉索以控制纵桥向线形为主, 共设置 4 组。临时拉索采用 $\phi 15.2$ 钢绞线, 单根最大设计长度为 348.736m, 塔端锚固于塔内锚梁。第 1 组临时拉索高约 58m; 第 2 组临时拉索, A 塔肢拉索高约 85m, B 塔肢拉索高约 88m; 第 3 组临时拉索, A, B 塔肢拉索均高约 106m; 第 4 组临时拉索, A 塔肢拉索高约 123m, B 塔肢拉索高约 124m。

- 4) 塔式起重机附墙。钢塔线形变化会对附墙结构受力产生较大影响, 因此合理布置附墙结构也是钢塔施工过程中较为关键的一项。由于附墙处 2 个塔肢最大净距 64.51m, 塔式起重机附墙设计有难度, 为保证塔式起重机附墙的安全性和可行性, 经过多次优化附墙设计计算, 提出将双塔肢附墙杆改为单塔肢附墙杆, 避免了附墙杆较长、受力角度不佳的不利状况, 如图 3 所示。第 1 道附墙与 A 塔肢连接, 第 2 道附墙与 B 塔肢连接, 附墙杆最大长度为 27.58m, 规格均为 $\phi 630\times 12$ 。

4 关键施工阶段计算分析

4.1 分析工况及有限元模型

钢塔共划分为 96 个小节段、49 个施工阶段 (CS1~CS49), 由于安装过程中采用临时拉索、支

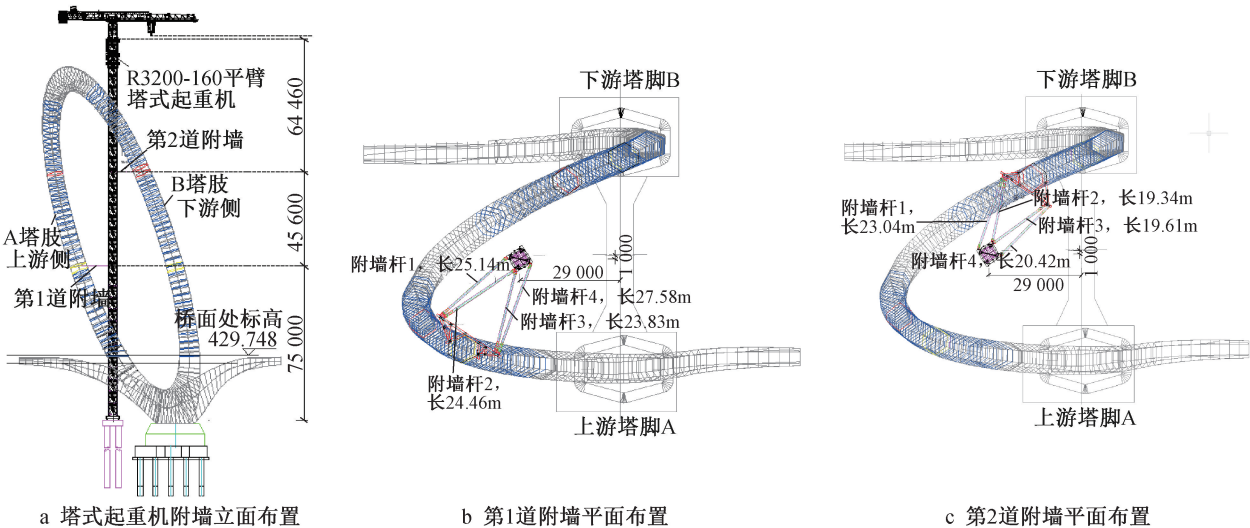


图 3 塔式起重机及附墙布置
Fig. 3 Layout of tower crane and attached wall

架、横撑进行线形调整,因此选取每种方式安装前、后作为关键分析工况。采用 MIDAS Civil 建立有限元模型,如图 4 所示,主梁、钢塔、支架及塔式起重机采用梁单元模拟,横撑采用桁架单元模拟,临时拉索采用索单元模拟,临时拉索地锚处、桥塔底部、支架底部节点采用刚接;支架与塔肢间采用竖向仅受压连接。

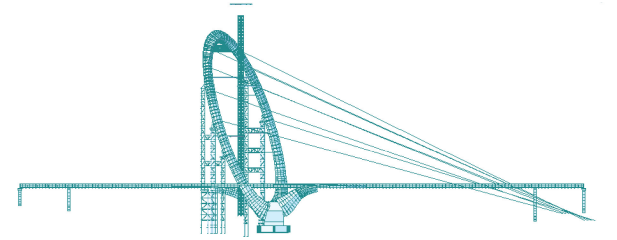


图 4 整体有限元模型
Fig. 4 Overall finite element model

4.2 钢塔安装过程中线形控制

分析临时拉索、横撑等临时结构对钢塔线形控制的影响,计算关键施工阶段下钢塔安装过程中两塔肢最大位移及接口处相对位移。经计算(见图 5, 6),临时调整措施对接口处位移影响为主导,钢塔最大纵桥向位移为 -100mm,最大横桥向位移为 -81mm;塔肢接口处顺桥向相对位移为 0,横桥向相对位移为 15mm。两塔肢接口处相对位移 $\Delta D_x, \Delta D_y$ 最大分别为 89, 144mm,临时拉索对钢塔线形调整的影响较明显,因此钢塔关键施工阶段位移变化总体呈折线趋势,横撑可有效减小塔肢纵、横向相对位移。

为验证本方案的可行性及有限元模拟的准确性,针对悬臂拼装方案与设计一次落架方案进行成桥状态线形、内力及索力对比分析。结果表明(见图 7,8):在恒荷载作用下,与设计一次落架相比,悬臂拼装成桥后钢塔纵桥向最大位移差为 6mm,整体

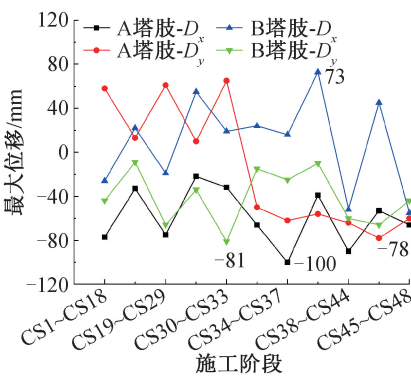


图 5 塔肢最大位移
Fig. 5 The maximum displacement of tower limbs

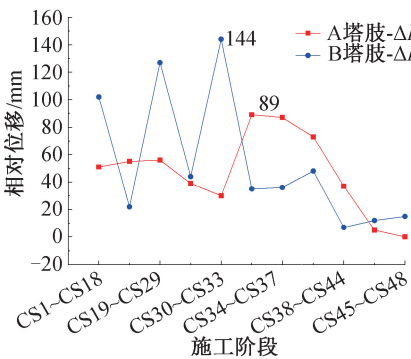


图 6 塔肢接口处相对位移
Fig. 6 Relative displacement at tower limb interface

偏差在 10% 以内;悬臂拼装成桥后钢塔最大弯矩偏差约 0.2%;拉索索力与设计成桥索力最大差值约 57kN,偏差在 2% 以内。综上所述,本文提出的悬臂拼装方案及其有限元模拟方法可有效反映桥梁力学行为,验证了方案的有效性和数值模型的可靠性。

4.3 塔式起重机垂直度计算分析

桥塔施工过程中,塔式起重机通过附墙与桥塔相连,钢塔施工过程中的线形变化必然会对塔式起重机及附墙产生影响,目前国内钢塔一般为竖直结

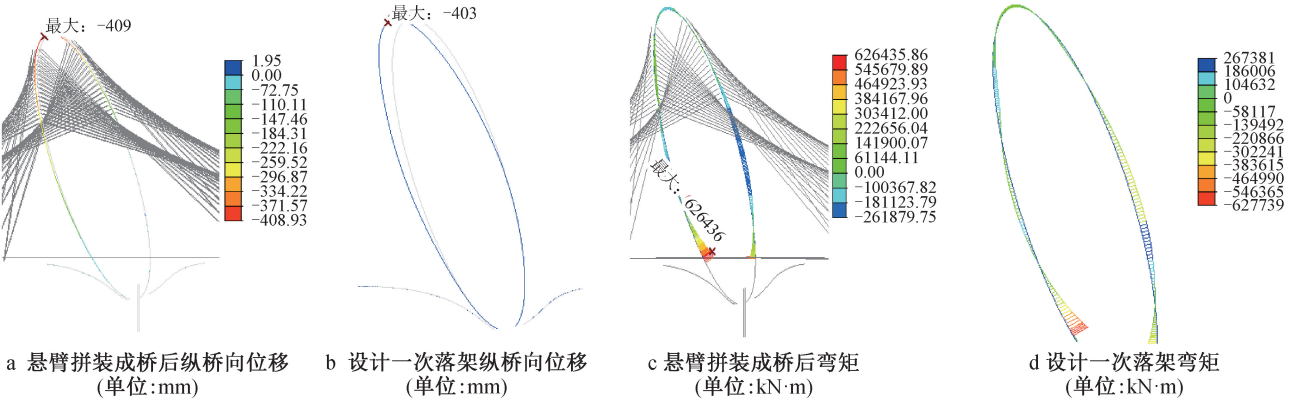


图 7 成桥状态钢塔位移及内力对比
Fig. 7 Comparison of displacement and internal force of steel tower in completed bridge state

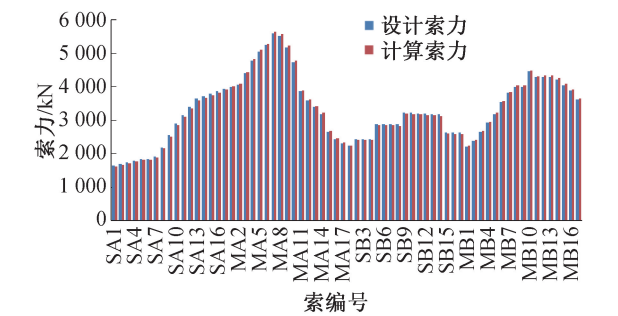


图 8 成桥状态设计索力和计算索力对比

Fig. 8 Comparison of design cable forces and calculated cable forces in completed bridge state

构,一般仅针对塔式起重机标准节进行受力计算,对塔式起重机垂直度关注较少。项目钢塔为空间扭曲斜塔,需关注塔式起重机安装过程中的垂直度^[12],确保其安全施工。根据 GB/T 13752—2017《塔式起重机设计规范》^[13]要求,在塔式起重机安装过程中,空载风速 $\leq 3\text{m/s}$ 时,塔身附着点以上垂直度 $\leq 0.4\%$,附着点以下垂直度 $\leq 0.2\%$ 。分析塔式起重机 2 道附墙安装后的最不利工况,并结合当地气温状态,考虑温度荷载对钢塔附墙位置处位移变化的影响。

第 1 道附墙安装后的最不利工况为主动横撑安装后,计算表明,塔式起重机第 1 道附墙安装后,第 1 个附着点以下塔身轴线偏移量最大为 45.01mm,满足允许偏差 150mm 的要求;塔式起重机顶部相对于第 1 个附着点塔身轴线偏移量最大为 65.13mm,满足允许偏差 257.8mm 的要求;第 2 道附墙安装后、第 3 道临时拉索张拉前为最不利工况,塔式起重机第 2 个附着点相对于第 1 个附着点塔身轴线偏移量最大为 52mm,满足允许偏差 91.2mm 的要求;塔式起重机顶部相对于第 2 个附着点塔身轴线偏移量最大为 80mm,满足允许偏差 257.8mm 的要求,如表 1,2 所示。综上所述,升温对钢塔及临时结构体系影响较大,在环境温度较高时,需实时监测塔身垂直度,确保塔身处于安全稳定状态。

4.4 联合体系静风响应分析

钢塔为空间扭曲斜塔,在施工过程中属于柔性结构,缺乏拉索体系的支撑作用,结构刚度较小,因此需考虑风荷载对结构位移响应的影响,且钢塔线形变化会进一步影响塔式起重机附墙受力。为保证施工过程中结构体系及设备安全,需考虑塔式起重机-钢塔联合体系耦合效应。钢塔风荷载按

Table 1 Displacement after the first attached wall installation							mm		
计算工况	第 1 道附墙位置处位移			塔式起重机顶部最大位移					
	D_x	D_y	D_{xy}	D_x	D_y	D_{xy}			
主动横撑安装状态(基准温度 20℃)	-20.49	-30.79	36.99	-50.00	-75.82	90.82			
主动横撑安装状态(基准温度 20℃)+ 钢塔升温 30℃+支架升温 25℃	-33.86	-26.94	43.27	-82.51	-66.28	105.84			
主动横撑安装状态(基准温度 20℃)+钢塔 升温 30℃+支架升温 25℃+临时拉索升温 10℃	-35.77	-27.32	45.01	-87.18	-67.31	110.14			
主动横撑安装状态(基准温度 20℃)+钢塔 降温 20℃+支架降温 15℃	-7.49	-31.57	32.45	-18.39	-77.80	79.94			
主动横撑安装状态(基准温度 20℃)+钢塔 降温 20℃+支架降温 15℃+临时拉索降温 10℃	-6.26	-31.56	32.17	-15.39	-77.69	79.20			
相对位移最大值	—	—	—	51.41	46.23	65.13			

Table 2 Displacement after the second attached wall installation										mm	
计算工况	第 1 道附墙位置处位移			第 2 道附墙位置处位移			塔式起重机顶部最大位移				
	D_x	D_y	D_{xy}	D_x	D_y	D_{xy}	D_x	D_y	D_{xy}		
第 3 道临时拉索张拉前状态(基准温度 20℃)	-32	-34	47	-65	-66	93	-117	-115	164		
第 3 道临时拉索张拉前状态(基准温度 20℃)+ 钢塔升温 30℃+支架升温 25℃	-47	-34	58	-82	-70	108	-137	-124	185		
第 3 道临时拉索张拉前状态(基准温度 20℃)+ 钢塔升温 30℃+支架升温 25℃+临时拉索升温 10℃	-48	-34	59	-86	-70	111	-144	-125	191		
第 3 道临时拉索张拉前状态(基准温度 20℃)+ 钢塔降温 20℃+支架降温 15℃	-19	-34	39	-48	-62	79	-96	-104	142		
第 3 道临时拉索张拉前状态(基准温度 20℃)+ 钢塔降温 20℃+支架降温 15℃+临时拉索降温 10℃	-18	-34	39	-45	-62	77	-89	-103	136		
相对位移最大值	—	—	—	-38	-36	52	-58	-55	80		

JTG/T 3360-01—2018《公路桥梁抗风设计规范》^[14]取值,考虑构件阻力系数、构件单位长度顺风投影面积;塔式起重机风荷载按《塔式起重机设计规范》取值,考虑塔身风力系数与实体迎风面积进行计算。结合塔式起重机起重臂与钢塔可能的相对位置关系,在有限元模型中按 $0^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 每 30° 取一风向(共12种工况),计算钢塔合龙前附墙处塔肢位移及附墙内力变化。

以钢塔合龙前工况为例,在工作状态及非工作状态下,联合体系模型附墙位置处塔肢位移及仅由钢塔风荷载引起的塔肢位移随风向角变化如图9所示。由图9可知,钢塔横桥向位移(D_y)大于顺桥向位移(D_x),钢塔位移主要由钢塔风荷载引起,非工作状态塔肢位移较大,最大约357mm,其中钢塔风荷载引起的位移约301mm,塔式起重机对钢塔产生的变形占比约20%;工作状态下塔肢位移较小,最大约103mm,钢塔风荷载引起的位移约44mm,塔式起重机对钢塔产生的变形占比约57%。综上所述,塔式起重机对桥塔位移的影响不宜忽略。

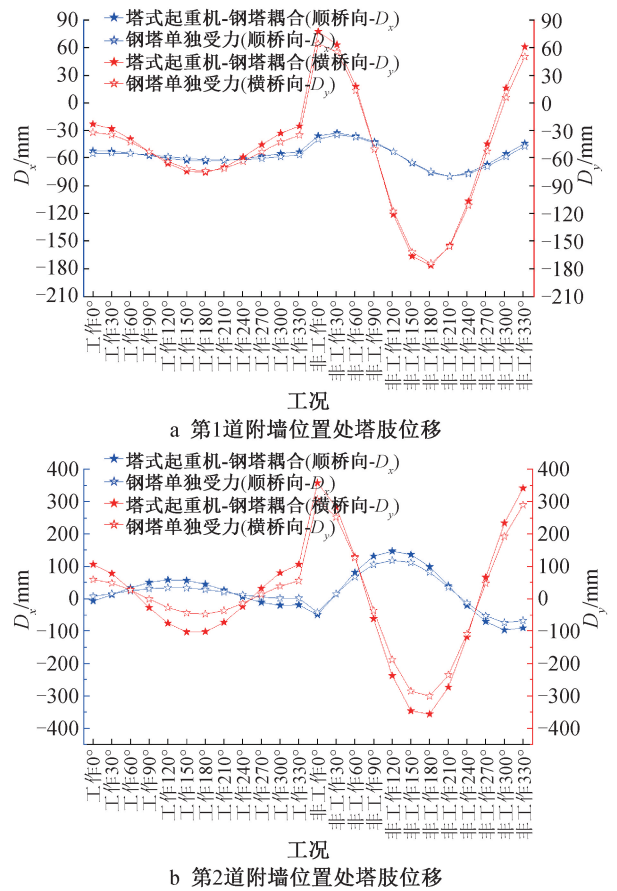


图9 联合体系对钢塔位移的影响分析

Fig. 9 Analysis of influence of joint system on the displacement of steel tower

4.5 塔式起重机附墙结构受力分析

塔式起重机附墙设计虽由厂家依据设备要求完成,但厂家通常不对联合体系进行整体计算。为确保附墙结构满足施工要求,需分析钢塔安装全过程对附墙受力的影响,并在关键施工阶段计入风荷载,进一步分析附墙受力的变化趋势^[15-16]。

塔式起重机配平状态且不考虑风荷载作用下,分析钢塔施工过程中线形变化对附墙内力变化的影响。经计算,在第2道附墙安装前的钢塔安装阶段,第1道附墙内力变化最大为19.03kN;第2道附墙安装后至钢塔合龙前,第1道附墙内力变化最大为106.66kN,第2道附墙内力变化最大为37.66kN,如图10所示,因此本方案中钢塔安装过程中线形变化对塔式起重机附墙内力的影响较小。

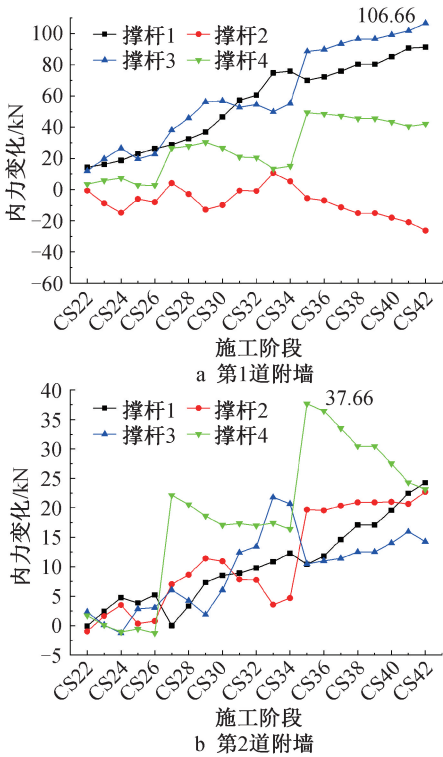


图10 钢塔施工过程中对附墙内力的影响分析

Fig. 10 Analysis of influence of construction process for steel tower on the internal force of attached wall

对联合体系关键施工阶段附墙内力进行计算分析。在工作状态和非工作状态下,塔式起重机在不同回转角度下,第1道附墙单根杆件最大轴力为-1 394kN,第2道附墙单根杆件最大轴力为-1 276kN。为分析联合体系对附墙受力的影响,建立单塔式起重机模型进行对比,以附墙受力最大杆件为例,对比结果如图11所示。由图11可知,附墙结构受力受钢塔线形影响,与单塔式起重机模型相

比,附墙杆件受力相对误差最大约为 10%。因此,建议塔式起重机附墙综合考虑 2 种模拟方式进行设计,考虑足够的安全系数,保障结构安全。

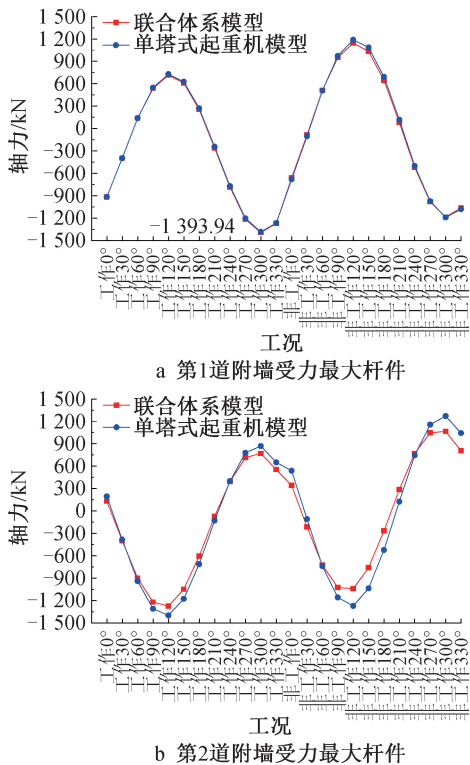


图 11 联合体系模型与单塔式起重机模型附墙轴力结果对比

Fig. 11 Comparison of axial force results for attached wall between joint system model and single tower crane model

5 结语

通过对超高空间异形钢塔施工过程中的关键技术进行深入研究,得到如下主要结论。

1)空间扭曲钢塔 3 个方向变形大,采用拉索+横撑+支架结构体系,可较好地控制桥塔线形与内力并实现钢塔高精度合龙。

2)空间异形钢塔采用塔式起重机吊装时,通过优化将双塔肢附墙杆改为单塔肢附墙杆,避免了附墙杆较长、受力角度不佳的不利状况,同时塔式起重机垂直度满足要求,可保证塔式起重机及附墙结构受力安全。

3)在塔式起重机-钢塔联合体系施工过程中,当塔式起重机处于工作状态时,由其引起的钢塔位移约占总位移的 20%;在非工作状态下,这一比例升至约 57%。因此,计算风荷载作用下桥塔受力与变形时,必须计入塔式起重机的影响。

4)塔式起重机-钢塔联合体系对附墙杆件受力

影响显著,类似工程应特别关注该影响,并在设计时取足安全系数,确保结构安全。

参考文献:

[1] 许前顺,牛亚洲,石虎强.大跨度索结构桥梁钢塔施工技术研究综述[J].公路,2017,62(6):84-89.
XU Q S,NIU Y Z,SHI H Q. Summary of construction technology of steel tower of long-span cable structure bridge[J]. Highway, 2017,62(6):84-89.

[2] 章德春,蒋本俊.太原迎宾桥钢塔牵引竖向转体施工关键技术[J].世界桥梁,2019,47(4):32-36.
ZHANG D C,JIANG B J. Key hauling and vertical rotating construction techniques for steel pylons of Yingbin Bridge in Taiyuan[J]. World bridges,2019,47(4):32-36.

[3] 李晓鹏,李林挺,周俊龙,等.金婺大桥桥塔竖向转体施工关键技术[J].世界桥梁,2024,52(1):58-64.
LI X P,LI L T,ZHOU J L,et al. Key vertical rotation construction techniques for pylons of Jinwu Bridge[J]. World bridges,2024, 52(1):58-64.

[4] 张平,吴成立,谢刚.湖州东苕溪大桥钢塔互拉式竖向转体施工技术[J].施工技术,2015,44(S1):319-322.
ZHANG P,WU C L,XIE G. Vertical rotation construction technology of steel tower in Dongtiao River Bridge of Huzhou[J]. Construction technology,2015,44(S1):319-322.

[5] 万雨帆,徐治芹,郑利军.宽桥面卵形独塔斜拉桥的设计与施工[J].城市道桥与防洪,2012(8):69-74,380.
WAN Y F,XU Z Q,ZHENG L J. Design and construction of wide deck ovate single-pylon cable-stayed bridge[J]. Urban roads bridges & flood control,2012(8):69-74,380.

[6] 曾才民,种艾秀,姜云.南京青奥公园步行桥圆弧形斜钢塔安装施工技术研究[J].现代交通技术,2014,11(6):38-41,48.
ZENG C M,CHONG A X,JIANG Y. Installation construction technology of skew steel tower of Nanjing Youth Olympic Park pedestrian bridge[J]. Modern transportation technology,2014, 11(6):38-41,48.

[7] 朱秋颖,胡晓红,韩治忠,等.钢桥塔与塔吊联合体系风荷载效应研究[J].上海公路,2022(2):26-29,84,165.
ZHU Q Y,HU X H,HAN Z Z,et al. Wind effect study on coupled system of steel bridge pylon and tower crane[J]. Shanghai highways,2022(2):26-29,84,165.

[8] 陈艾荣,姜一凡,张其玉,等.带吊机钢桥塔施工状态抖振响应及风振舒适性研究[J].桥梁建设,2021,51(5):20-28.
CHEN A R,JIANG Y F,ZHANG Q Y,et al. Study of buffeting response and wind-induced vibration comfort of a steel pylon with a tower crane in construction stage[J]. Bridge construction, 2021,51(5):20-28.

[9] 马如进,李方宽,胡晓红,等.钢桥塔与塔吊联合体系抖振响应试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(1):92-99.
MA R J,LI F K,HU X H,et al. Experimental study of buffeting response for joint system of steel pylon and tower crane[J]. Journal of Hunan University (natural sciences),2021,48(1): 92-99.

下架体搭设建议。

1)可调托撑伸出顶层水平杆的悬臂长度宜 $\leq 500\text{mm}$ 且应 $\leq 650\text{mm}$;当悬臂长度 $> 500\text{mm}$ 且 $< 650\text{mm}$ 时,立杆承载力设计值应乘以0.85的折减系数。

2)模板支撑架安全等级为Ⅰ级时,顶层步距宜比标准步距缩小0.5m。

3)当模板支撑架搭设高度为16~24m时,顶层步距内应每跨布置斜杆,并应在架体四周外排立杆上满布斜杆。

参考文献:

[1] 段先军,雷素素,刘云飞,等.北京大兴国际机场航站楼核心区超大平面复杂结构模架支撑体系设计与施工[J].施工技术,2019,48(20):35-39.
DUAN X J,LEI S S,LIU Y F,et al. Design and construction of super large plan complex structure formwork support system in core area of Beijing Daxing International Airport terminal[J]. Construction technology,2019,48(20):35-39.

[2] 邓应平,张永坡,张宝利,等.盘扣式脚手架在大跨度椭圆形弦支穹顶结构施工中的应用[J].施工技术,2017,46(14):39-41.
DENG Y P,ZHANG Y P,ZHANG B L,et al. Application of disk lock scaffold in the construction of long-span elliptical suspendome structure[J]. Construction technology,2017,46(14):39-41.

[3] 钱晓军.盘扣式及碗扣式钢管支架节点试验及应用技术研究[D].南京:东南大学,2016.
QIAN X J. Research on test and application technology of disk lock and bowl lock steel tubular support joints[D]. Nanjing:

Southeast University,2016.

[4] 刘哲,刘战伟,张兆龙,等.重型承插型盘扣式钢管脚手架连接节点抗弯性能研究[J].施工技术(中英文),2024,53(2):110-116.
LIU Z,LIU Z W,ZHANG Z L,et al. Bending performance of heavy-duty socket-type disk lock steel tubular scaffold connection joints[J]. Construction technology,2024,53(2):110-116.

[5] 吉萌.盘扣式钢管支架节点性能及支架稳定承载力研究[D].西安:西安工业大学,2024.
JI M. Study on joint performance and stability bearing capacity of disc-type steel pipe support[D]. Xi'an:Xi'an Technological University,2024.

[6] 南通新华建筑集团有限公司,江苏速捷模架科技有限公司.建筑施工承插型盘扣式钢管脚手架安全技术标准:JGJ/T 231—2021[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.
Nantong Xinhua Construction Group Co., Ltd., Jiangsu Rapid Molding Technology Co., Ltd. Technical standard for safety of disk lock steel tubular scaffold in construction JGJ/T 231—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2021.

[7] 郭正兴,温科,陈安英.盘扣式钢管模板支撑架高效应用技术[J].施工技术(中英文),2024,53(17):67-70,130.
GUO Z X,WEN K,CHEN A Y. Efficient application technology of plate-type steel pipe formwork support frame[J]. Construction technology,2024,53(17):67-70,130.

[8] 刘哲,刘战伟,张兆龙,等.重型承插型盘扣式钢管脚手架连接节点抗弯性能研究[J].施工技术(中英文),2024,53(2):110-116.
LIU Z,LIU Z W,ZHANG Z L,et al. Study on flexural behavior of heavy-duty socket-type steel tubular scaffold connection joints[J]. Construction technology,2024,53(2):110-116.

(上接第48页)

[10] 苏洋,李鹏,胡朋,等.施工态下塔吊对钢桥塔涡激振动影响的风洞试验[J].公路交通科技,2020,37(9):67-72,89.
SU Y,LI P,HU P,et al. Wind tunnel test on influence of tower crane on vortex-induced vibration of steel bridge pylon at construction stage[J]. Journal of highway and transportation research and development,2020,37(9):67-72,89.

[11] 汪仁威,胡伟,余煜东.超高钢箱-钢管混凝土桥塔塔柱施工关键技术[C]//2023年全国工程建设行业施工技术交流会议论文集,2023.
WANG R W,HU W,YU Y D. Key construction technology of super high steel box-concrete filled steel tube bridge tower column[C]//Proceedings of the 2023 National Engineering Construction Industry Construction Technology Exchange Conference,2023.

[12] 高斌.塔机垂直度的测量与控制[J].建筑机械化,2014,35(8):78-80.
GAO B. Tower crane verticality measurement and control[J]. Construction mechanization,2014,35(8):78-80.

[13] 北京建筑机械化研究院,中联重科股份有限公司,哈尔滨工业大学.塔式起重机设计规范:GB/T 13752—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

Beijing Construction Mechanization Research Institute, Zoomlion Heavy Industry Science & Technology Co., Ltd., Harbin Institute of Technology. Design rules for tower cranes: GB/T 13752—2017[S]. Beijing: Standards Press of China,2017.

[14] 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,2018.
Tongji University. Wind-resistant design specification for highway bridges:JTG/T 3360-01—2018[S]. Beijing: China Communications Press,2018.

[15] 尤田,王琦,汪聪颖,等.钢塔塔吊附墙与主动横撑设计及受力分析[J].公路交通科技,2021,38(S1):84-91.
YOU T,WANG Q,WANG C Y,et al. Design and stress analysis of attached wall and active cross brace of steel tower crane[J]. Journal of highway and transportation research and development,2021,38(S1):84-91.

[16] 管东银,朱金柱,张兰芳.斜拉桥桥塔塔吊附墙设计及其钢塔耦合效应研究[J].公路工程,2024,49(1):32-38.
GUAN D Y,ZHU J Z,ZHANG L F. Study on design of attached wall of tower crane of cable-stayed bridge and coupling effect of steel tower[J]. Highway engineering,2024,49(1):32-38.