

DOI: 10.7672/sjgs2025200022

钢屋盖单樛径向梁柔性支撑吊装技术*

姚成冲¹, 陈学朋¹, 赵绪华¹, 罗宗礼¹, 孙侨博¹, 卓俊峰¹,麦慧琳², 刘有金², 朱彪²

(1. 中国建筑第四工程局有限公司, 广东 广州 510630;

2. 广州新中轴建设有限公司, 广东 广州 510623)

[摘要] 轮辐式索承网格结构在大跨度体育场馆建设中具有显著优势,但其施工过程面临复杂的技术挑战。针对“先索后钢”施工工艺的关键技术难点展开研究,重点分析柔性索网支承条件下上部钢结构安装的稳定性问题,尤其是首樛径向梁吊装阶段的侧向稳定性控制。基于实际工程需求,采用有限元数值模拟方法,对钢梁吊装过程中的结构响应进行精细化分析,并通过足尺吊装试验验证模拟结果的准确性。研究表明,合理的临时支撑布置和索力优化可有效提升施工阶段的稳定性,保证结构安装精度。研究成果已应用于广州足球公园球场项目,优化了施工流程,使工期缩短约20%。

[关键词] 钢结构;屋盖;柔性索网;支撑;径向梁;吊装;有限元分析;试验

[中图分类号] TU758

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)20-0022-07

Flexible Support Hoisting Technology of Radial Beams for Steel Roof

YAO Chengchong¹, CHEN Xuepeng¹, ZHAO Xuhua¹, LUO Zongli¹, SUN Qiaobo¹,
ZHUO Junfeng¹, MAI Huilin², LIU Youjin², ZHU Biao²

(1. China Construction Fourth Engineering Division Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510630, China;

2. Guangzhou New Central Axis Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510623, China)

Abstract: The spoke-type cable-supported grid structure has significant advantages in the construction of large-span stadiums and gymnasiums, but its construction process faces complex technical challenges. The key technical difficulties of the construction technology of first cable and then steel are studied, and the stability of the upper steel structure installation under the condition of flexible cable net support is analyzed, especially the lateral stability control of the first radial beam hoisting stage. Based on the actual engineering requirements, the finite element numerical simulation method is used to analyze the structural response of the steel beam during the hoisting process, and the accuracy of the simulation results is verified by the full-scale hoisting test. The research shows that reasonable temporary support arrangement and cable force optimization can effectively improve the stability of the construction stage and ensure the installation accuracy of the structure. The research results were applied to the Guangzhou Football Park Stadium project, which optimizes the construction process and shortens the construction period by about 20%.

Keywords: steel structures; roofs; flexible cable net; supports; radial beam; hoists; finite element analysis; tests

0 引言

轮辐式索承网格是当代大跨度体育场馆建设中广泛采用的新型空间结构体系。从技术发展来看,该结构体系已形成完善的设计理论和分析方法;施工技术持续革新,特别是“先索后钢”等新型

* 中国建筑第四工程局有限公司科技研发课题:轮辐式索承网格结构施工创新技术研究(CSCEC4B-2025-KTA-18)

[作者简介] 姚成冲,助理工程师,E-mail: yaochengchongcn@163.com

[收稿日期] 2025-06-20

工法得到实践应用;同时,高强度索材等新材料和节点构造优化技术不断进步。传统“先钢后索”工艺包括:架设支撑胎架→组装上部网格→张拉索结构→拆除胎架。而创新的“先索后钢”工艺包括:预张拉索网→设置临时工装索→安装上部钢结构→拆除临时拉索。

作为国内首个应用“先索后钢”工艺的工程,广州足球公园球场项目面临柔性索网支承条件下钢结构安装的技术难题。由于索网结构的柔性特性,其形态确定和施工稳定性成为关键课题。为此,本研究针对该项目首根径向梁在柔性索网上的安装过程进行数值仿真分析,并开展全尺寸吊装试验以验证模拟结果的可靠性。

1 工程概况

广州足球公园球场项目总建筑面积约 47.8 万 m²,建筑主体高度达 63.6m,采用地上 4 层(含高层看台)、地下 3 层的空间布局。项目效果如图 1 所示。



图 1 项目效果
Fig. 1 Effect of the project

钢罩棚结构由外压环桁架、内罩棚和外帷幕组成。钢结构总重约 2.1 万 t,其中内罩棚重约 1.25 万 t。如图 2 所示,外压环桁架与下部混凝土看台结构相连,其中 V 形撑柱脚采用铰接支座与混凝土结构相连,环梁与径向杆件和径向索则通过销轴连接。内罩棚采用大开口轮辐式索承网格结构,由 72 榀径向布置的径向桁架、下环向索及环向构件组成。每榀径向桁架包含上部桁架、径向索及支撑杆件。

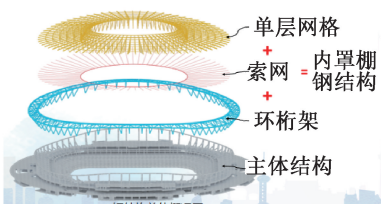


图 2 钢屋盖结构
Fig. 2 Structures of steel roof

索网系统由 72 组径向索和 10 道环向索构成,总长度达 4 060m。采用直径 130~140mm 密封钢

索,其最小破断拉力可达 18 700kN。其中,8 根径向索采用内置光纤传感器的智能索技术。结构剖面如图 3 所示。

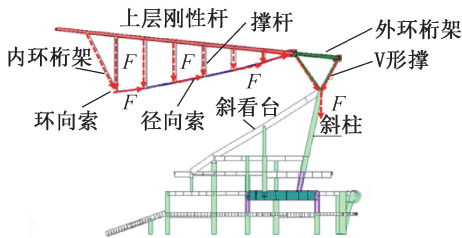


图 3 结构剖面
Fig. 3 Profile of the structure

2 有限元分析

2.1 试验模型

屋盖结构采用“先索后钢”施工方法。径向梁的安装采用单榀(分 2 段)吊装方案:在索网张拉完成、工装索将环向索下拉至设计标高后,吊装径向梁先与周围支撑钢结构采用销轴连接,然后逐渐下放吊钩,从外向内依次将撑杆下节点与径向索和环向索连接,脱钩后张拉两侧交叉索至设计索力,过程中调节下拉索维持环向索处于设计标高。

将施工模型分为 10 个工况,依次建立有限元模型:工况 1,如图 4a 所示,前置条件为下拉工装索,将环向索下拉至设计标高;工况 2,如图 4b 所示,下放吊钩,径向梁与周围支撑结构采用销轴连接,安装和预紧两侧竖向交叉索;工况 3,如图 4c 所示,继续下放吊钩,将撑杆 1(最外圈)与径向索连接;工况 4,如图 4d 所示,继续下放吊钩,将撑杆 2 与径向索连接;工况 5,如图 4e 所示,继续下放吊钩,将撑杆 3 与径向索连接;工况 6,如图 4f 所示,继续下放吊钩,将撑杆 4 与径向索连接;工况 7,如图 4g 所示,继续下放吊钩,将撑杆 5 与径向索连接;工况 8,如图 4h 所示,继续下放吊钩,将撑杆 6 与径向索连接;工况 9,如图 4i 所示,所有径向撑杆连接完成,吊点脱钩;工况 10,如图 4j 所示,张拉两侧交叉索,安装两侧临时支撑和临时交叉索。

2.2 选取关键工况作为模型试验榀

通过对单榀径向梁吊装施工过程进行 1:1 模型试验,监测径向梁位形、径向索索夹标高、径向索索力及撑杆轴力的发展规律,评估方案的可行性与安全性,并验证有限元模拟的准确性。选取径向索 JS-140-11 所对应的径向梁进行试验,如图 5 所示。

参照实际工程施工图纸,按 1:1 建立试验模型。拟采用的试验装置如图 6 所示,包括试验反力架、水平工装索、下拉工装索、侧向稳定索、侧向稳定斜撑

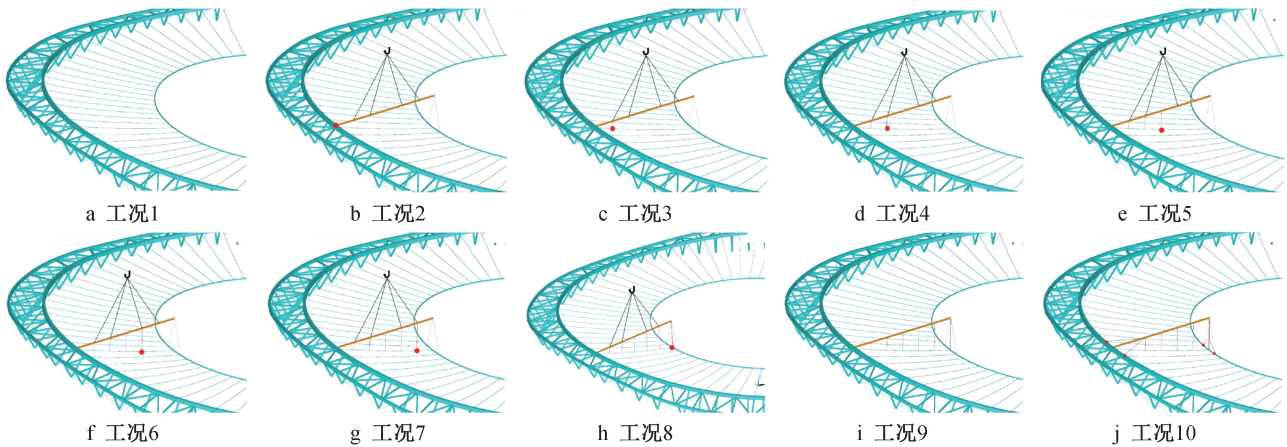


图 4 施工工况

Fig. 4 Construction conditions

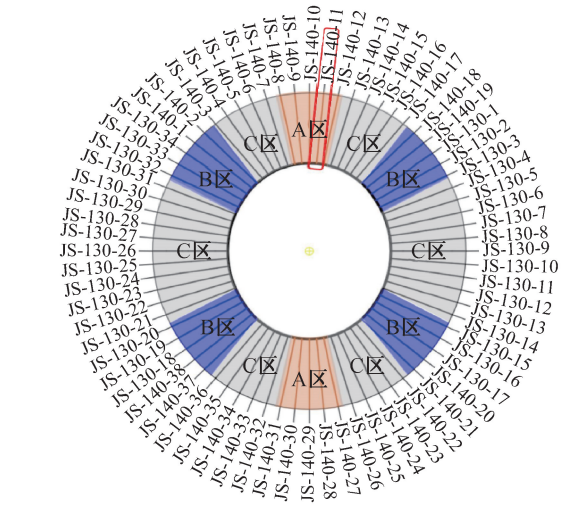


图 5 模型试验樁位置

Fig. 5 Position of model test frame

及单樁结构,其中单樁结构包括径向主梁、撑杆、径向索和竖向交叉索。

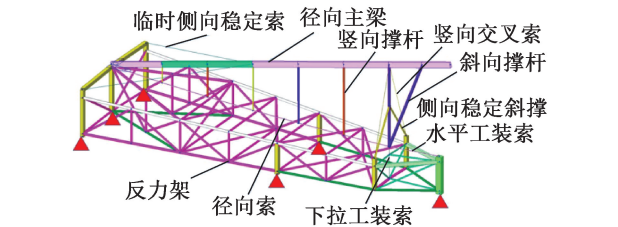


图 6 试验装置

Fig. 6 Experimental device

试验工况包括:①安装试验反力架;②安装和张拉径向索和水平工装索;③安装和张拉下拉工装索;④吊装径向梁,依次由外向内连接撑杆与径向索,并调整下拉工装索、安装和张拉临时侧向稳定索和竖向交叉索;⑤安装悬挑段,调整下拉工装索,并安装侧向稳定斜撑。

试验结构采用的拉索规格如表 1 所示,单樁钢结构规格如表 2 所示,反力架结构如图 7 所示,反力架规格如表 3 所示,钢材型号均为 Q355。

表 1 拉索规格

Table 1 Specifications of cables

拉索	类型	规格	单樁吊装后 索力/kN	应力/ MPa
径向索	1570 密封索	φ140	5 015.4	405.5
水平工装索	1570 密封索	φ130	5 037.5	439.2
下拉工装索	1860 钢绞线	4φ15.2	92.7	165.6
侧向稳定索	1770 钢丝绳	φ36	吊装后预紧	—
竖向交叉索	1670 钢绞线	φ50	吊装后预紧	—

表 2 单樁钢结构规格

Table 2 Specification of single steel structure

构件	规格	构件	规格
径向梁	□800×400×16×25	撑杆 3	φ245×10
	□1 000×400×20×40	撑杆 4	φ351×10
撑杆 1(最外)	φ245×10	撑杆 5	φ351×10
撑杆 2	φ351×12	撑杆 6	φ351×10

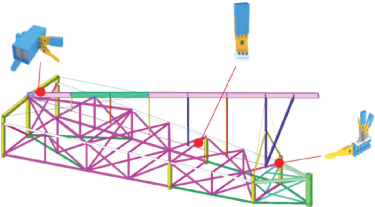


图 7 反力架结构示意图

Fig. 7 Structure of reaction frame

表 3 反力架规格

Table 3 Specifications of reaction frames

截面编号	规格	截面编号	规格
1	φ299×10	17	□600×400×25
12	□1 000×800×40	18	φ245×10
13	□600×600×25	19	φ450×16
15	φ500×16	20	φ402×12
16	φ351×12		

2.3 模型关键工况响应

1) 吊装单元竖向位移(见图 8)。

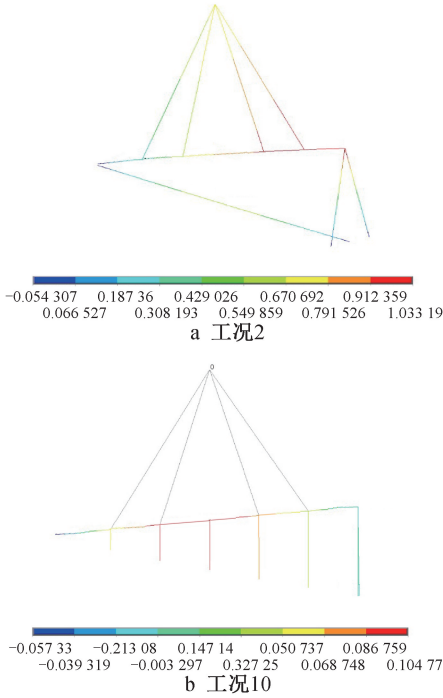


图 8 吊装单元竖向位移云图(单位:m)
Fig. 8 Vertical displacement of hoisting unit (unit:m)

- 2) 环向索径向位移(见图 9)。
- 3) 径向梁应力(见图 10)。
- 4) 撑杆轴力(见图 11)。
- 5) 模型试验关键工况结构响应(见表 4,5)。

2.4 分析结论

2.4.1 位移响应变化趋势

1) 在吊装过程中,吊点、径向梁内端、径向索索夹竖向位移变化趋势如图 12 所示,吊点从工况 2 开始逐渐下降,径向梁内端、各径向索索夹高度随之下降。在工况 2~9 时,径向梁内端竖向位移从 1 033.3mm 降至 12.8mm,径向索索夹竖向位移从

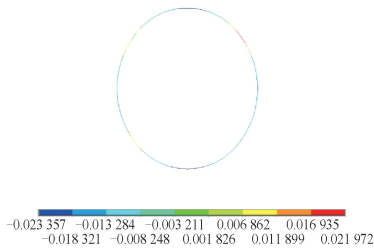


图 9 工况 10 环向索径向位移云图(单位:m)
Fig. 9 Vertical displacement of hoop cable in condition 10(unit:m)

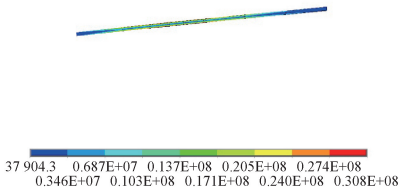


图 10 工况 10 径向梁应力云图(单位:Pa)
Fig. 10 Stress of radial beam in condition 10(unit:Pa)



图 11 工况 9 撑杆轴力云图(单位:N)
Fig. 11 Axial force of brace rod in condition 9(unit:N)

318.1~619.9mm 降至 45~103.8mm。
2) 环向索索夹径向位移变化趋势如图 13 所示。在工况 1 时,由于环向索初张力的作用,环向索向场内收缩,环向索索夹径向位移为-21mm;在工况 2~9 时,随着径向梁逐渐安装到位,该环向索索夹逐渐向场外移动,径向位移从-19.2mm 变化至-10mm。

表 4 吊装过程位移响应

Table 4 Displacement response during hoisting process									mm
工况	竖向位移 U_z								环向索索夹 径向位移 U_x
	吊点	径向梁 内端	径向索 索夹 1	径向索 索夹 2	径向索 索夹 3	径向索 索夹 4	径向索 索夹 5	环向索 索夹	
1	—	—	381.5	567.0	619.1	636.5	317.8	0	-21.0
2	700	1 033.3	382.6	567.9	619.9	537.1	318.1	0	-19.2
3	655	952.7	374.6	561.5	615.1	533.9	316.5	0	-19.2
4	500	694.8	321.5	505.4	573.1	505.9	302.6	0	-18.9
5	395	544.0	288.4	442.3	518.4	469.6	284.4	0	-18.4
6	265	413.2	248.5	371.8	413.2	390.7	245.1	0	-17.3
7	180	338.8	212.7	314.3	338.6	296.3	188.0	0	-15.9
8	130	276.4	174.4	257.7	276.2	237.9	144.3	0	-14.7
9	0	12.8	65.1	98.1	104.3	84.3	45.8	0	-10.0
10	0	0	64.9	97.8	103.8	83.6	45.0	0	-10.0

表 5 吊装过程受力响应
Table 5 Stress response during hoisting process

工况	轴力/kN						吊索	两侧竖向交叉索	径向梁等效应力/ MPa	吊点竖向反力/ kN
	撑杆 1	撑杆 2	撑杆 3	撑杆 4	撑杆 5	撑杆 6				
1	—	—	—	—	—	—	3 690	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	3 690	267. 2	120. 0	459. 0
3	-0. 42	—	—	—	—	—	3 690	263. 7	120. 0	454. 5
4	-19. 50	-0. 31	—	—	—	—	3 700	254. 2	126. 0	427. 9
5	-20. 20	-18. 10	-0. 25	—	—	—	3 710	243. 2	125. 0	401. 5
6	-23. 40	-18. 10	-27. 10	-0. 21	—	—	3 740	212. 7	117. 0	354. 5
7	-28. 10	-20. 40	-26. 30	-24. 60	-0. 82	—	3 770	178. 2	104. 0	299. 0
8	-35. 20	-26. 10	-30. 80	-29. 50	-13. 40	-0. 46	3 790	134. 5	84. 9	227. 3
9	-57. 10	-43. 60	-45. 10	-46. 50	-32. 70	-64. 80	3 890	—	30. 7	0
10	-57. 10	-43. 70	-45. 10	-46. 50	-33. 20	-403. 60	3 890	199. 2/198. 2	30. 8	0

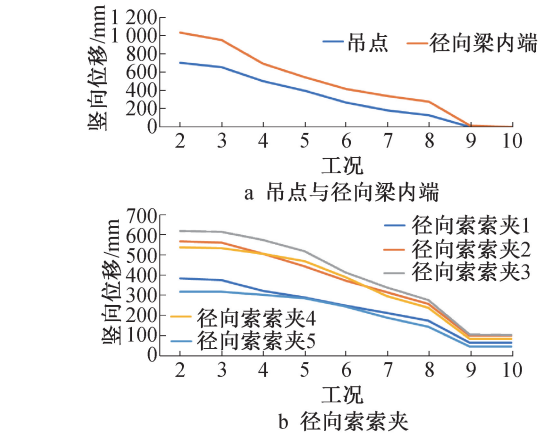


图 12 竖向位移变化趋势
Fig. 12 Vertical displacement variation trend

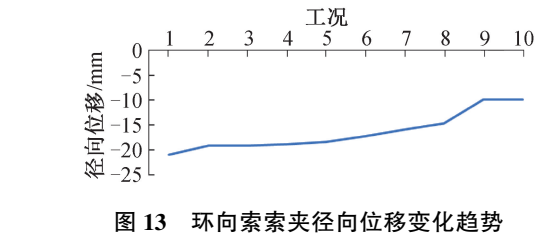


图 13 环向索索夹径向位移变化趋势
Fig. 13 Radial displacement variation trend of hoop cable clamp

2. 4. 2 内力响应变化趋势

1) 撑杆轴力。在吊装过程中,由场外向场内将撑杆下端与径向索连接。如图 14 所示,在工况 3~8 时,每根撑杆连接径向索时,撑杆均受压(-0.25~-0.86kN)且接近 0,随着后续撑杆的连接,已连接的撑杆轴力逐渐增大;最终撑杆轴力最大为-403.6kN,位于撑杆 6。

2) 吊索索力。如图 15 所示,随着吊点下降,径向梁自重逐渐由撑杆(撑杆轴力增大)和周围支撑钢结构承担,吊索索力逐渐减小(267.2kN→0)。

3) 环向索索力。在安装过程中,如图 16 所示,

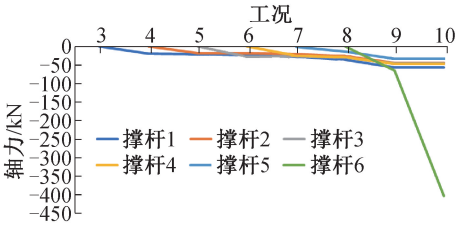


图 14 撑杆轴力变化趋势
Fig. 14 Axial force variation trend of brace rods

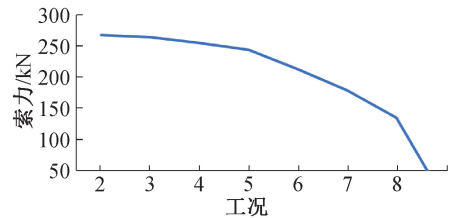


图 15 吊索索力变化趋势
Fig. 15 Force variation trend of suspender cable

环向索索力略有增大(3 690kN→3 890kN)。

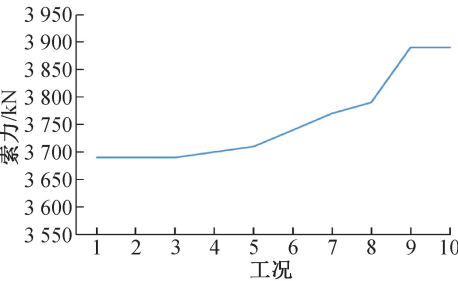


图 16 环向索索力变化趋势
Fig. 16 Force variation trend of hoop cable

4) 径向梁应力。如图 17 所示,在工况 3~10 时,随着撑杆依次连接,撑杆对径向梁的弹性支承作用逐渐增大,径向梁等效应力呈下降趋势(120MPa→30.8MPa)。

5) 吊点竖向反力。如图 18 所示,随着吊点下降,径向梁自重逐渐由径向索承担,吊点竖向反力

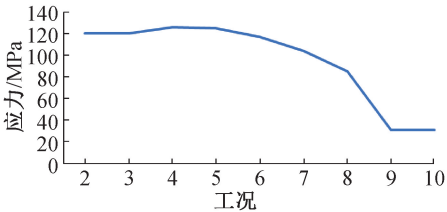


图 17 径向梁应力变化趋势

Fig. 17 Stress variation trend of radial beam

逐渐减小(459kN→0kN)。

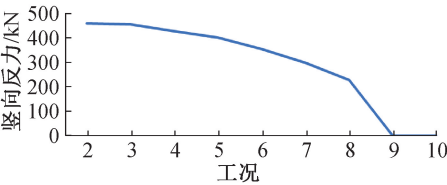


图 18 吊点竖向反力变化趋势

Fig. 18 Vertical reaction force variation trend of hoisting point

3 足尺试验

3.1 试验概况

广州足球公园球场项目施工现场试验时间为2024-12-06—2024-12-09,现场试验如图 19 所示。



图 19 现场试验

Fig. 19 Site testing

在索、工装索固定位置设置压力传感器,可在控制系统界面直接显示当前索力,现场采用徕卡测量机器人,通过电脑远程控制和读取测量结果,对所有监测点定时循环全自动测量。

表 6 撑杆上、下节点标高变化

Table 6 Elevation variation of the upper and lower joints for brace rods													mm
试验步	撑杆编号												
	1		2		3		4		5		6		
	下	上	下	上	下	上	下	上	下	上	下	上	
安装索夹 1	-0.300	-0.300	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
安装索夹 2	-75.200	-74.100	-120.100	-127.800	—	—	—	—	—	—	—	—	
安装索夹 3	-71.900	-75.600	-120.200	-125.300	-124.400	-122.100	—	—	—	—	—	—	
安装索夹 4	-125.400	-129.000	-227.600	-223.700	-289.300	-288.700	-211.500	-212.900	—	—	—	—	
安装索夹 5	-131.500	-125.000	-221.100	-221.900	-270.000	-273.500	-207.700	-206.400	-93.900	-100.300	—	—	
连接撑杆 6	-166.800	-171.800	-303.900	-299.300	-386.100	-386.600	-315.000	-322.700	-188.800	-212.400	-0.300	-0.300	
起重机松钩	-262.100	-261.400	-424.600	-423.800	-498.500	-497.400	-422.200	-419.600	-260.700	-254.300	-5.200	-4.000	

3.2 试验结果

设有限元模型结果为理论值,试验结果为实测值,各试验步下撑杆上、下节点标高变化如表 6 所示,汽车式起重机松钩后撑杆下节点标高变化如表 7 所示,撑杆垂直度如表 8 所示,撑杆轴力如表 9 所示,径向索索力对比如表 10 所示,表格中的标高变化值均相对于下拉索张拉完成的线形。

表 7 汽车式起重机松钩后撑杆下节点标高变化

Table 7 Elevation variation of the lower joints for brace rods after loose hook of truck crane							mm
项目	撑杆编号						
	1	2	3	4	5	6	
理论值	-313.600	-452.100	-501.900	-433.800	-276.900	-3.400	
实测值	-262.200	-424.600	-498.500	-422.200	-260.700	-5.200	
差值	51.400	27.500	3.400	11.600	16.200	-1.800	

表 8 汽车式起重机松钩后撑杆垂直度

Table 8 Verticality of brace rods after loose hook of truck crane							
项目	撑杆编号						限值
	1	2	3	4	5	6	
垂直度	1/130	1/222	1/555	1/6 250	1/4 348	1/558	1/120

表 9 汽车式起重机松钩后撑杆轴力

Table 9 Axial force of brace rods after loose hook of truck crane						
项目	撑杆编号					
	1	2	3	4	5	6
理论值/kN	-82.0	-51.0	-67.4	-50.9	-68.0	-53.9
实测值/kN	-87.9	-55.8	-74.7	-54.9	-73.5	-63.2
误差值/%	7.20	9.40	10.83	7.86	8.09	17.25

表 10 径向索索力对比

Table 10 Comparison of radial cable force				kN
项目	试验步			
	径向索张拉	下拉工装索张拉	起重机脱钩	
理论值	3 784.1	4 615.9	5 009.3	
实测值	3 893.8	4 864.7	5 410.1	

汽车式起重机松钩后撑杆下节点标高实测值与理论值基本吻合(见图 20)。

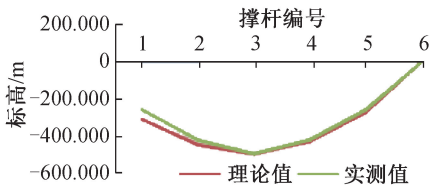


图 20 汽车式起重机松钩后撑杆下节点标高变化趋势
Fig. 20 Elevation variation trend of the lower joints for brace rods after loose hook of truck crane

汽车式起重机松钩后撑杆垂直度最大为工况 2 条件下的 1/222,满足最大限值 1/120 的要求。

径向索索力对比如图 21 所示。

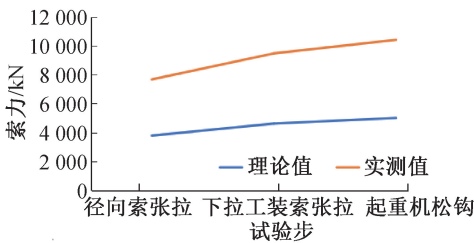


图 21 径向索索力对比

Fig. 21 Comparison of radial cable force

起重机松钩前已安装张拉两侧稳定斜索,导致环向索索夹撑杆轴力实测值明显偏大,下拉索力实测值明显偏小。

汽车式起重机松钩后撑杆轴力实测值大于理论值(见图 22)。

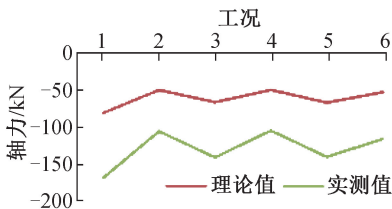


图 22 汽车式起重机松钩后撑杆轴力

Fig. 22 Axial force of brace rods after loose hook of truck crane

以上分析表明,在吊装过程中,环向索索夹基本位于设计标高,下拉索索力逐步减小;吊装就位后,单榀桁架处于稳定状态,下拉索处于受拉状态,径向索线形与理论基本相符,撑杆均受压且垂直度良好。因此,单榀吊装试验验证了施工方案的可行性和合理性。

4 结语

轮辐式索承网格结构作为较常见的钢结构形式,充分利用其自身结构特点,可采用“先索后钢”施工方法,该施工方法需解决基于柔性索网的径向梁稳定安装问题。本文通过有限元模拟分析与试验验证,采用下拉工装索、侧向索、侧向钢拉杆等措施,保证了单榀径向梁在柔性索网上安装的稳定性,解决了轮辐式索承网格结构采用“先索后钢”法施工的一大重要难题。本项目钢结构采用该方案,共减少约 4 000t 胎架用钢,将施工工期缩短 1 个月,有效推动了轮辐式索承网格结构施工过程的低碳化进程。

参考文献:

[1] 赵通.大跨度正交索网屋盖结构施工技术及受力分析[J].施工技术(中英文),2025,54(8):17-22.
ZHAO T. Construction technology and stress analysis of large-span orthogonal cable net roof structure [J]. Construction technology, 2025, 54(8): 17-22.

[2] 余进江.大开口车辐式索承网格结构设计与施工一体化研究[D].重庆:重庆大学,2020.
YU J J. Research on integration of structural design and construction of large-opening spoke-type cable-supported grid structure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.

[3] 刘怡吟,张其林,罗晓群.体育场轮辐式索承网格结构施工模拟分析[J].建筑结构,2021,51(S1):2213-2218.
LIU Y Y, ZHANG Q L, LUO X Q. Construction simulation analysis of spoke cable-supported grid structure in stadium[J]. Building structure, 2021, 51(S1): 2213-2218.

[4] 袁野,张其林,张舒翔,等.大跨度轮辐式单双层索网结构施工过程模拟[J].施工技术(中英文),2023,52(20):15-20.
YUAN Y, ZHANG Q L, ZHANG S X, et al. Simulation of construction process for large-span wheel-spoke single-double-layer cable net structures [J]. Construction technology, 2023, 52(20): 15-20.

[5] 朱峰.基于无支架施工的环形索承网格结构设计与施工一体化研究[D].南京:东南大学,2018.
ZHU F. Research on the integration of design and construction of ring cable-supported grid structure based on scaffoldless construction[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.

[6] 支超,周生部,刘鲁,等.日照奎山体育中心轮辐式索网施工技术[J].施工技术(中英文),2023,52(5):73-77.
ZHI C, ZHOU S B, LIU L, et al. Construction technology of spoke cable net in Rizhao Kuishan Sports Center [J]. Construction technology, 2023, 52(5): 73-77.