

超大跨度双跨机库局部加强及提升施工技术研究

王 昂¹, 贾尚瑞¹, 邢遵胜^{1,2*}, 严航洋¹

(1. 浙江精工钢结构集团有限公司, 浙江 绍兴 312030; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 大跨度维修机库屋盖钢结构施工技术中,“地面原位拼装+两阶段累积提升”是一种经济、高效的施工方法。目前行业内大跨度双跨机库均采用“三边支撑柱顶设置提升架+大门开口边设置数量不等的临时提升塔架”的技术路线,临时塔架对地基承载力要求高,而填海造陆地区的地基承载力低,塔架底部地基处理难度大,原有技术路线无法满足现场施工要求,故迫切需要研发一种新的施工技术,来解决软弱地基区域机库钢屋盖的安装。基于厦门翔安太古2号维修机库项目的实践,行业内首次提出和采用了“大门桁架局部加强及其无临时支撑提升”的施工技术,该技术通过对大门桁架结构布置进行调整,实现了大门开口边不再设置临时提升塔架,利用现有结构柱就能进行提升施工,使施工态与设计态结构边界尽可能一致,从而将施工过程对结构应力的影响降至最小。通过全过程施工模拟分析,对钢屋盖进行拼装预变形和对约3.6%的杆件截面进行微调。通过采用新的施工技术,解决了软弱地基地区机库施工地基处理困难的问题,施工方式相较于传统工艺更为简单,具有良好的经济效益,可为类似工程施工提供参考。

关键词: 双跨机库; 大跨度屋盖钢结构; 无支点整体提升; 预变形; 施工模拟分析; 施工技术

中图分类号: TU758.11

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)02-0085-12

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20241008001

Study on Partial Reinforcement and Lifting Construction Technology for a Double Large-Span Hangar

WANG Ang¹, JIA Shangrui¹, XING Zunsheng^{1,2*}, YAN Hangyang¹

(1. Zhejiang Jinggong Steel Building Group Co., Ltd., Shaoxing 312030, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

*Corresponding author: 65553089@qq.com

Abstract: During the construction process of the steel roof structure of a large-span maintenance hangar, in-situ assembly on the ground with two-stage cumulative lifting is an economical and efficient construction method. Nowadays, the double large-span span hangar in the field adopts the technology of installing lifting frames on the top of the three support columns and temporary lifting towers at the gate opening. Temporary tower structures require high foundation bearing capacity, while reclaimed land typically has low bearing capacity. The foundation construction for the tower is relatively difficult, and the original technology cannot meet the on-site construction requirements. Therefore, a new construction technology is needed to solve the installation of the steel roof of the hangar in soft foundation areas. Based on the practice of the Xiamen Xiang'an Taigu 2 Maintenance Hangar Project, a technique involving partial strengthening of the gate truss and non-temporary-support lifting was proposed and adopted for the first time. This technology adjusts the layout of the gate truss structure to eliminate the need for temporary lifting towers at the gate opening, and uses existing structural columns for lifting. This makes the boundary conditions in the construction state

收稿日期: 2024-10-08

作者简介:

王 昂(1995—),男,硕士,工程师,主要从事钢结构施工技术方面的研究。E-mail:1227916450@qq.com。

通信作者:

邢遵胜(1982—),男,博士研究生,正高级工程师,主要从事钢结构设计、制造和施工方面的研究。E-mail:65553089@qq.com。

as consistent as possible with those in the design state, thereby minimizing the impact of the construction process on structural stress. Through the simulation analysis of the whole construction process, the steel roof assembly and pre-deformation measurement were conducted, and the sections of about 3.6% of the members were fine tuned. Through new construction techniques, the problem of foundation treatment for hangar construction in soft foundation areas can be solved. This type of construction method is simpler than traditional techniques and has good economic benefits, which can provide a reference for similar engineering construction.

Keywords: double-span hangar; large-span steel roof structure; overall lifting without temporary support; pre-deformation; construction simulation analysis; construction technology

随着国内经济建设与民航事业的高速发展,大量城市掀起了新建或扩建机场的浪潮^[1-2],飞机维修需求的日益增加也加速了维修机库等相关配套设施的建设。大跨空间结构多采用网架结构体系^[3],随着飞机尺寸越来越大,其对维修机库内部空间要求也越来越高,结构跨度的不断增加也使得结构施工难度也越来越大。

维修机库钢屋盖主要以单跨机库与双跨机库为主,作为一种特殊的大跨空间结构,其主要特点为三边支承,一边开口,结构形式多为大门桁架+焊接球网架。随着整体提升施工技术以及计算机控制技术的发展,整体提升施工技术也成为机库大跨钢屋盖主要的施工方法,针对该施工方法,为了降低施工对原始结构设计受力状态的影响,常采用优化施工顺序及换杆的方法^[4]。

高空作业的减少可以更好地保证大跨度维修机库屋盖结构的拼装质量,减少施工措施费用以及缩短工期,考虑到多数机库的大门开口边结构与内部结构存在高差的原因,蒋寿时等^[5]提出了“两阶段整体提升”的施工方法,即第一阶段整体提升大厅屋盖结构,与大门桁架/网架结构对接合龙后进行第二阶段的整体提升。

根据上述施工方法,国内机库常用施工方式为在三边支撑结构柱上方设置提升架,在大门开口边设置落地临时提升塔架,如山西太原拆解基地项目1#拆解机库、首都机场A380机库、北京大兴南航机库、上海浦东波音机库等^[6-9]。第一阶段提升大厅屋盖结构时,根据结构跨度的不同,在大门开口边均设置数量不等的临时提升塔架,与大门桁架/网架结构对接合龙后,多数单跨机库在第二阶段整体提升时不再继续使用临时提升塔架,而全部采用结构柱上方的提升架体进行提升;而超大跨度双跨机库因大门桁架为双跨连续梁,施工过程中桁架的连续性因中柱原因被中断,导致双跨连续梁变为了简支梁,与设计状态受力模式相差较大,因此在第二阶段整体提升时,为了减小大门桁架的受力,大门开口边仍然采用数量不等的落地提升塔架,在填海造陆地区,此类施工方式还存在临时提升塔架下部地基基础难以处理的问题。

综上所述,本文基于厦门翔安太古2号维修机库,对填海造陆地区的超大跨度双跨机库整体提升关键技术进一步探索研究,提出一种大门桁架局部加强及无临时塔架的整体提升施工技术。通过不同局部加强方案的比选,在大门中柱位置增设“四节间双Y传力桁架”,保证了施工态

结构边界与设计态结构边界接近,实现了超大跨度双跨结构无临时支点整体提升,解决了填海造陆地区地基加固困难的难题。根据设计及施工一体化施工模拟分析计算的结构变形及应力比结果,对结构进行拼装预变形及少量换杆,实施中效果良好,可为类似双跨机库施工提供参考。

1 工程概况

厦门太古翔安新机场维修基地项目位于厦门市翔安区大嶼片区机场北路与环嶼路交叉口东南侧,建筑面积约292 300 m²,由1号、2号机库及其他附属单体组成,内部能容纳12架广体飞机及6架窄体飞机,项目效果如图1所示。其中2号机库坐西朝东,由维修机库、喷漆机库以及沿机库后山墙全长建设的附楼及附楼装饰架组成。

2号维修机库钢屋盖由机库大厅与4个机头库网架组成,机库大厅轴线尺寸为341.10 m×74.20 m,单个机头库轴线尺寸为21.10 m×26.30 m,结构三边支承,一边开口,大门开口边跨度为170.50 m+170.50 m,远大于60 m^[10]跨度,因此为超大跨度双跨机库。机库采用大门桁架和三层两向正交斜放焊接球网架组成的楔形厚板作为结构受力体系,机库大厅支撑体系由混凝土大门中柱、四肢钢管混凝土柱、双肢格构柱及柱间支撑组成,结构平面图如图2所示。

大门桁架截面总高度为16.50 m,节间长度为8.50 m,下沉4.00 m,上弦中心标高为38.500 m,下弦中心标高为22.000 m;三层网架高8.66~12.23 m,基本网格尺寸为6.01 m×6.01 m,下弦杆件中心标高为26.000 m,剖面图如图3所示。大门桁架采用焊接箱形截面与焊接H形截面,屋盖网架杆件规格最小为P102 mm×4 mm、最大为P500 mm×3 mm,焊接球规格最小为Φ350 mm×14 mm、最大为Φ900 mm×36 mm,选用Q355B钢。大门桁架箱形构件最大截面为B600 mm×600 mm×70 mm,选用Q460C钢。

2 提升施工方案研究

2号维修机库钢屋盖提升面积约23 600 m²,提升重量约4 500 t,第一阶段提升大厅网架区域,提升高度4 m,第二阶段提升大厅网架与大门桁架区域,提升高度22 m。

该工程屋盖结构为超大跨度钢屋盖,且位于填海造陆地区,地基承载力弱,施工难度极大。为了保证施工质量、进度与安全,降低工程造价,选择合理的提升施工方



图1 项目效果图

Fig. 1 Rendering of project

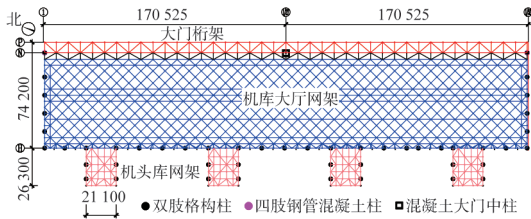


图2 2号维修机库平面图(单位:mm)

Fig. 2 Plan of maintenance hangar No. 2(unit:mm)

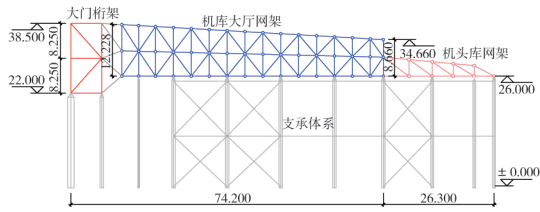


图3 2号维修机库侧视图(单位:m)

Fig. 3 Side view of maintenance hangar No. 2(unit:m)

案尤为重要。

2.1 提升点布置及提升方案

提升点选取的原则是保证钢屋盖整体结构受力合理,确保屋盖提升过程中的稳定性。

第一阶段提升大厅网架结构,需在网架四周设置数量不等的提升点,如图4所示。因大门桁架地面拼装阶段与大厅网架存在4m高差,且大门桁架构件截面规格大、刚度大,根据这一特点,提出第一阶段提升施工采用在结构柱及大门桁架上方设置提升架的方式,如图5所示。

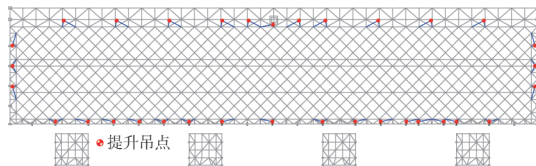


图4 第一阶段提升点布置图

Fig. 4 Arrangement of lifting points at the first stage

第二阶段整体提升施工均采用原有结构柱作为提升点,针对大门中柱位置,通过采用不同的处理方式,提出

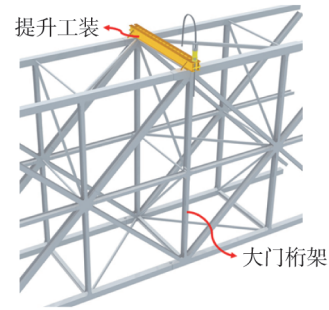


图5 提升工装示意图

Fig. 5 Schematic diagram of lifting tooling

以下三种方案:

方案1:利用原有结构柱作为提升点,不再设置临时提升塔架,如图6a)所示。

方案2:对于因大门中柱而被断开的内侧桁架,在4个节间区域增设双Y传力桁架(红色)进行加强处理,如图6b)所示。

方案3:对于因大门中柱而被断开的内侧桁架,在8个节间区域增设双Y传力桁架(红色)进行加强处理,如图6c)所示。

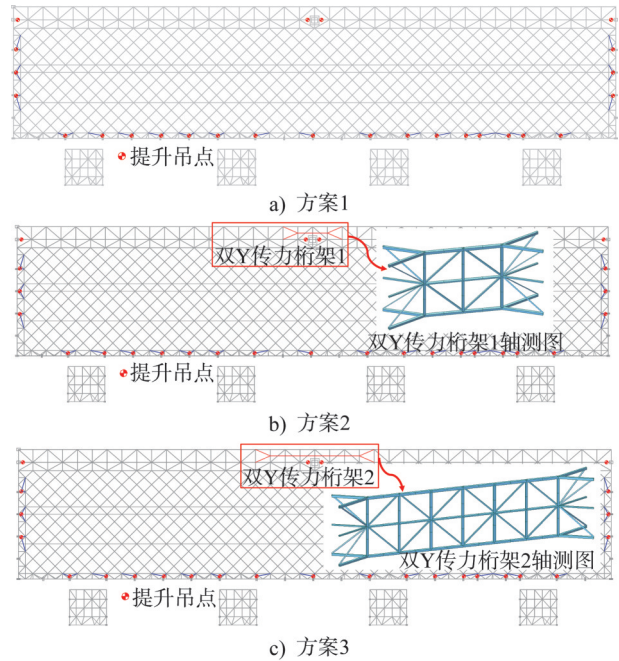


图6 第二阶段提升方案

Fig. 6 Second stage lifting scheme

2.2 提升方案分析

利用有限元软件MIDAS对以上三种方案分别进行计算分析,并选取大门桁架上下弦杆进行弯矩计算,杆件选取位置如图7所示。

结构分析时,柱底边界采用刚接模拟;提升点边界采用弹性约束模拟,z向完全约束,x、y方向设置 $1\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的较小刚度,保证结构收敛。

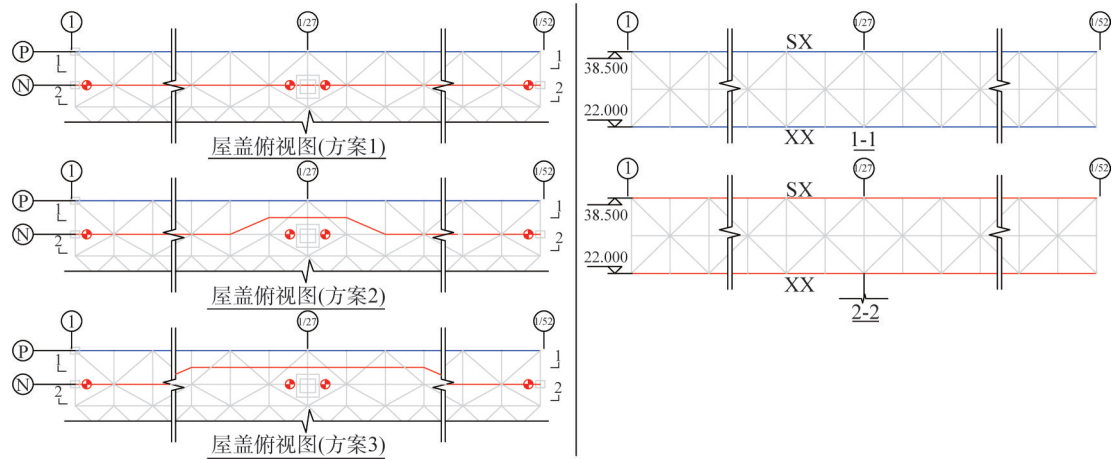


图7 杆件选取位置(单位:m)

Fig. 7 Selection position of bar components (unit: m)

结构施工过程中的荷载包括结构杆件自重、焊接球重量、马道重量、屋面主檩条及大门桁架位置墙架重量、喷淋管道重量、电器桥架重量。大门桁架位置实际仅有桁架结构自重,以及马道、墙架、屋面檩条及机电管道重量,因此将结构自重及荷载细分为大门桁架和网架两部分区域。大门桁架位置的结构自重系数根据深化模型中大门桁架实际重量进行计算取值,模拟中通过修改大门桁架位置材质容重来模拟;马道、墙架、屋面主檩条及机电管道重量按节点荷载对应施加于大门桁架相对应节点上。大厅屋盖网架及机头库网架位置的马道、屋面主檩条及机电管道重量,按节点荷载施加于网架节点上,焊接球重量采用杆件节点系数乘以节点荷载来模拟,杆件节点系数取1.1,节点荷载根据深化模型焊接球重量与计算模型杆件重量的差值进行计算取值。

屋面主檩条荷载施加于上弦节点处、马道荷载根据图纸位置施加于对应下弦节点处、大门墙架荷载施加于外侧大门桁架节点处,机电管道荷载施加于所有节点处,自重系数以外的焊接球荷载施加于所有网架节点处。

提升施工阶段应力比验算时荷载取 $1.5Q_{GK}$,卸载施工阶段应力比验算时荷载取 $1.3G_k^{[11-12]}$,结构变形验算时荷载取 G_k , Q_{GK} 为被提升结构和设备重量的标准值, G_k 为永久荷载标准值,数字为分项系数。

将各方案在结构提升施工阶段、补杆完成阶段、卸载阶段的N轴及P轴大门桁架上下弦杆弯矩分别与与设计一次成型状态下的大门桁架上下弦杆弯矩进行对比,如图8所示。

由图8可知,三种施工方案大门桁架弦杆弯矩相较于设计态大门桁架弦杆弯矩仅大门中柱位置附近弯矩差异较大,其他位置的弯矩相似。对大门中柱附近的桁架弦杆弯矩进行分析,结构设计状态下(图8a),两榀大门桁架中柱附近四网格的上下弦杆受力均为负弯矩,外侧桁架弦杆弯矩为 $-232.30\sim 107.83\text{ kN}\cdot\text{m}$,内侧桁架弦杆弯矩为

$-619.71\sim 86.22\text{ kN}\cdot\text{m}$,为典型两跨连续梁受力特性;当内侧大门桁架不采用任何加固措施时(图8b),外侧桁架弦杆弯矩为 $-451.60\sim 223.89\text{ kN}\cdot\text{m}$,内侧桁架弦杆弯矩为 $-746.82\sim 423.10\text{ kN}\cdot\text{m}$,因内侧桁架被中柱中断,失去了桁架的连续性,结构卸载后,弦杆受力模式在中柱位置变成了正弯矩,因此,外侧桁架弦杆在中柱位置的弯矩比设计态外侧桁架弦杆的弯矩增大近2倍,内侧桁架正弯矩增大近5倍,与设计态受力情况相差较大;当内侧大门桁架采用中柱4个节间区域增设双Y传力桁架的加强处理措施时(图8c),外侧桁架弦杆弯矩为 $-370.79\sim 146.36\text{ kN}\cdot\text{m}$,内侧桁架弦杆弯矩为 $-278.83\sim 326.99\text{ kN}\cdot\text{m}$;当内侧大门桁架采用中柱8个节间区域增设双Y传力桁架的加强处理措施时(图8d),外侧桁架弦杆弯矩为 $-497.72\sim 223.05\text{ kN}\cdot\text{m}$,内侧桁架弦杆弯矩为 $-351.06\sim 123.48\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。当桁架采用以上两种方式进行局部加强后,建立了新的连续梁传力路径,结构卸载后,内侧加固桁架受力模式均与设计态接近,但8节间加固方案与未加固方案相比,外侧桁架的受力大小接近,且负弯矩较未加固方案大10%,表明因8节间加固桁架的自重较大,此加固方式对外侧桁架的受力情况带来了不利影响。因此综合对比三种方案,4节间加固方案外侧桁架的受力情况与结构设计状态下外侧桁架的受力情况更为吻合。

中柱下提升点及提升工装如图9所示,中柱两侧提升荷载相近,提升架设置在中柱上方,采用格构柱形式,在提升工装分配梁上方每个提升点对应位置设置2根亚字形提升梁,每根提升梁上方布置2台405t提升器。桁架下弦两侧每个下提升点位置共设置4个下吊点提升工装。

由图9可知,提升过程中,选取内侧大门桁架下弦杆与斜腹杆、外侧大门桁架中柱位置处上下弦杆作为关键受力杆件,如图10所示。表1为在整体提升施工阶段三种施工方案下,关键杆件轴力及N轴大门桁架跨中变形的计算结果,图11为三种施工方案下,关键杆件轴力对比图。

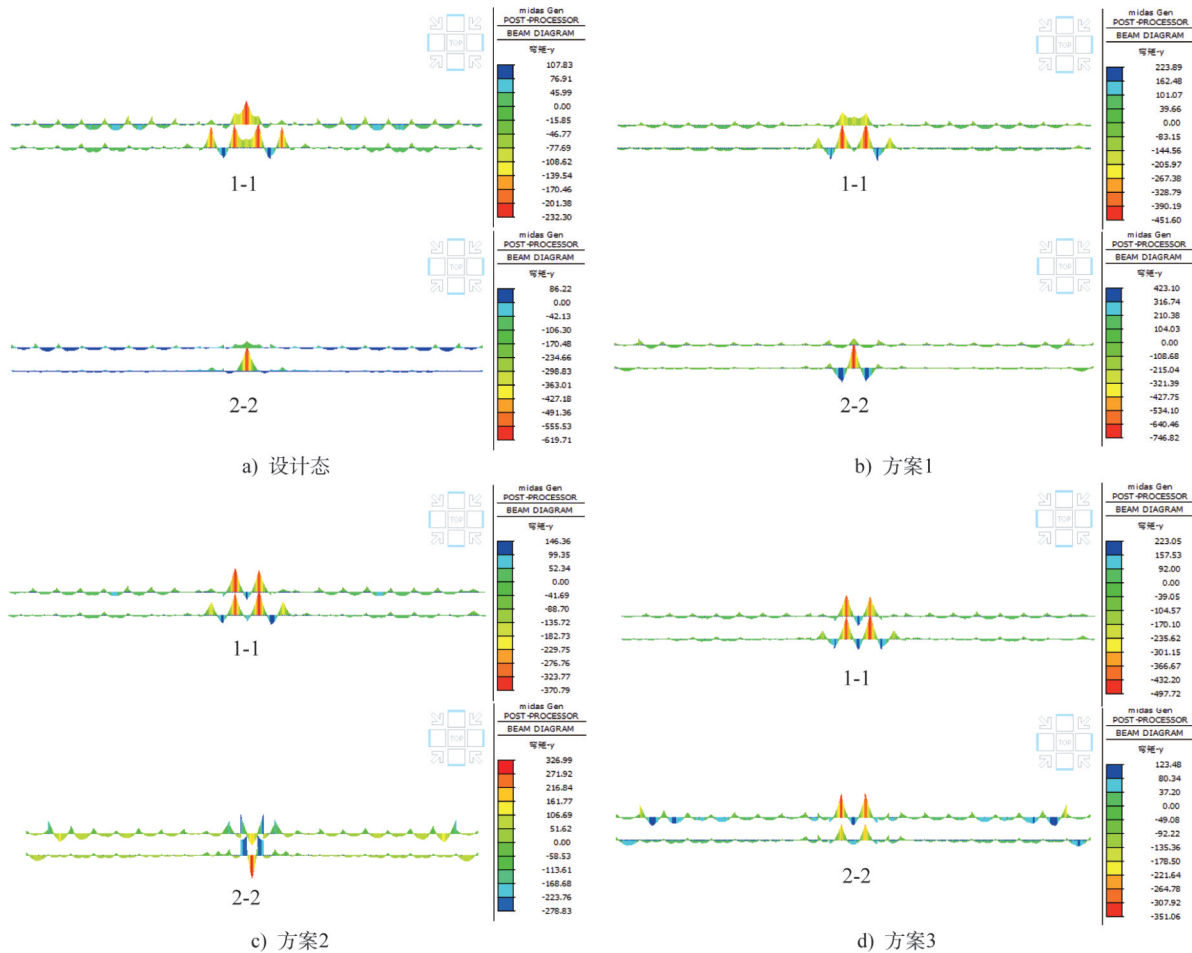


图8 大门桁架弦杆弯矩(单位:kN·m)

Fig. 8 Bending moment of gate truss chord (unit:kN·m)

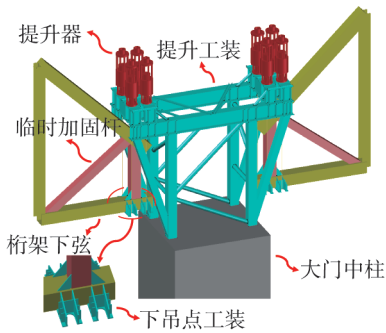


图9 中柱提升点工装示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the tooling for the center column lifting point

通过表1与图11的数据分析可以看出:

方案1选取了原结构支承点作为提升点,提升点位置受力与原结构受力相接近,最大提升力出现在大门桁架中柱位置处。因提升施工的原因,内侧桁架在大门中柱位置处被断开,连续梁效应消失,造成外侧桁架杆件1与杆件2受力均较大,大门桁架位置换杆数量多,且关键杆件3为受拉状态,与设计状态下结构受力模式相反,不符合设计受力理念。

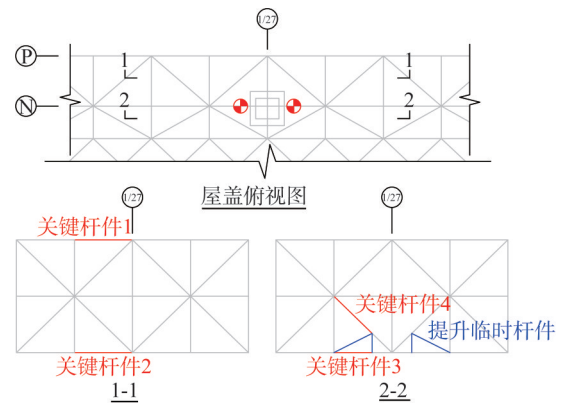


图10 大门桁架关键杆件布置图

Fig. 10 Arrangement of key members of the gate truss

方案2在大门中柱位置的两榀大门桁架中间的4个节间区域采用了传力桁架,保证了连续梁效应,该方案与方案1关键杆件受力对比见图11。相较于方案1,关键杆件1在提升阶段受力减小了41.0%,关键杆件2在提升阶段受力减小了48.3%,关键杆件3在提升阶段受力减小了100.7%,受力模式由受拉杆件转变为受压杆件,关键杆件4在提升阶段受力增加了42.1%。从受力模式上看,采用该方案在提升状态与实际使用状态结构的受力

表1 三种方案结构关键杆件内力及跨中变形值

Table 1 Internal forces and mid-span deformation values of key members in three schemes

方案	关键杆件1/kN	关键杆件2/kN	关键杆件3/kN	关键杆件4/kN	跨中变形/mm	最大提升反力/kN
方案1	7 362.0	-7 750.6	1 420.5	-6 621.5	-143	9 464.3
方案2	4 344.1	-4 007.9	-10.9	-9 407.5	-132	10 107.7
方案3	5 375.2	-5 446.1	-34.1	-9 947.0	-137	10 625.9

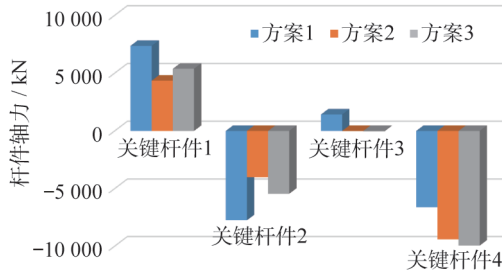


图11 大门桁架关键杆件轴力对比

Fig. 11 Comparison of axial force of key members of the gate truss

模式相接近。

方案3在大门中柱位置的两榀大门桁架中间的8个节间区域采用了传力桁架,该方案与方案2关键杆件受力对比见图11。虽然传力桁架相较于方案2的传力桁架进一步变大,但关键杆件1、关键杆件2相较于方案2,在提升阶段受力分别增加了23.7%、36.4%,跨中变形也进一步增大,对结构受力的改善效果与经济效益均不如方案2。

综上所述:采用方案2对大门桁架进行局部加强后,对内外两榀桁架的受力改善效果最好,因此按照方案2开展进一步研究。

2.3 中柱提升点分析

由前文分析可知,中柱桁架位置提升点受力非常大,而提升器最大规格为405 t,额定提升能力为328 t,提升点设置在中柱位置被断开的下弦桁架两侧,因此提升器数量为2的倍数,当单个提升点采用4台405 t提升器时,总提升能力为1 620 t,为提升荷载的1.6倍,额定提升能力1 312 t,为提升荷载的1.3倍,满足《重型结构和设备整体提升技术规范》(GB 51162—2016)^[12]对提升设备提升能力的要求。

中柱位置提升工装是提升能否成功的关键,因此用MIDAS软件对下吊点工装采用实体网格形式进行多尺度分析,对中柱上方提升工装进行有限元分析,评估工装在施工过程中的可靠性。计算结果分别见图12、图13。

由图12中 von Mises 应力云图可知,下吊点工装最大应力为206.21 MPa,且节点整体应力均较小,从变形云图可以看出各杆件相对位移很小,说明节点具有较大刚度,下吊点工装的受力可靠;由图13可知,提升工装在标准荷载工况组合下,架体整体变形为5 mm,变形较小,在1.3D+1.65L基本荷载工况组合下(D为结构自重,L为

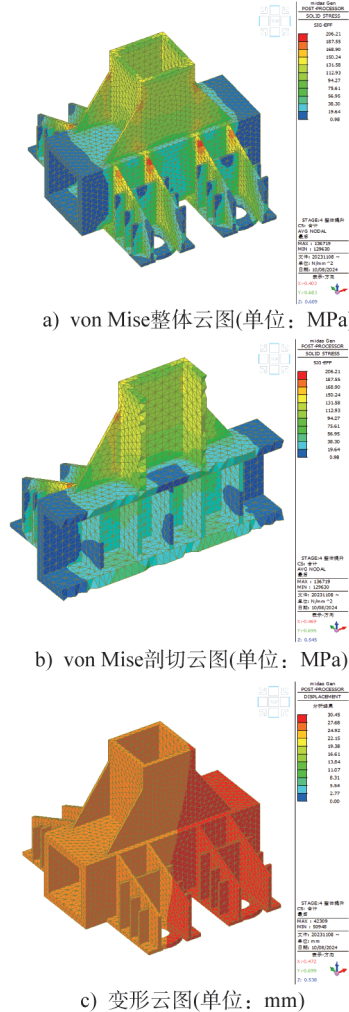


图12 提升下吊点工装计算结果

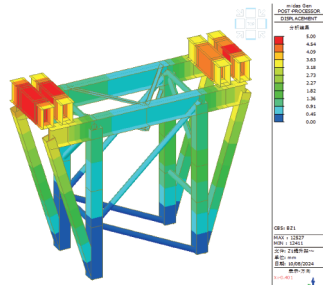
Fig. 12 Calculation results of lifting point tooling

提升吊点荷载),杆件最大应力比为0.81,提升工装具有1.96倍的安全储备,提升工装的受力可靠。

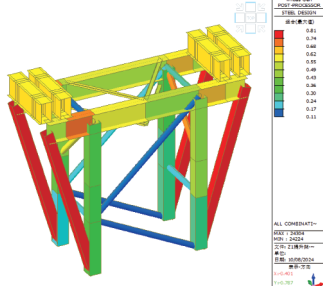
2.4 4节间双Y传力桁架分析

传力桁架如图14所示,其位于大门中柱附近,对结构整体安全性起重要的作用,节点为多杆连接,受力复杂,为验证传力桁架节点区安全性,对受力最大的下弦节点区2个关键节点进行多尺度分析,计算模型见图15,分析结果见图16。

由 von Mises 应力云图可知,节点1最大应力为159.31 MPa,节点2最大应力为177.87 MPa,节点整体应力均较小,从节点1与节点2的变形云图可以看出各杆件相对位移很小,说明节点具有较大的刚度,传力桁架节点的受力可靠。



a) 变形云图(单位: mm)



b) 应力比云图

图13 提升工装计算结果

Fig. 13 Calculation results of lifting tooling

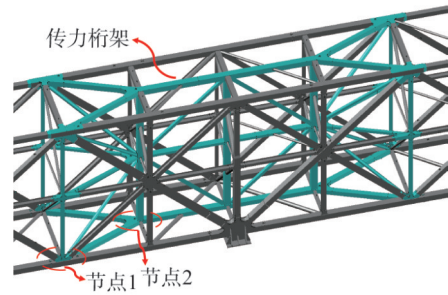


图14 传力桁架图

Fig. 14 Transmission truss diagram

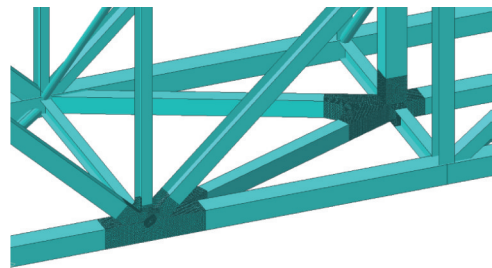
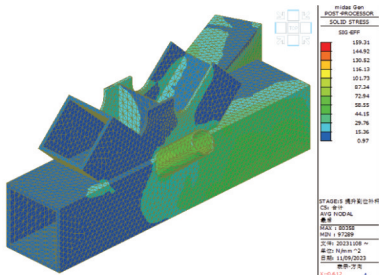
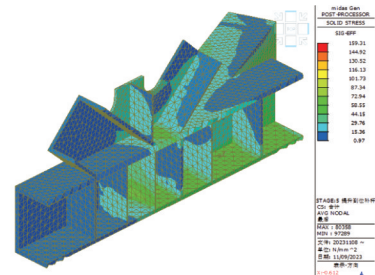


图15 传力桁架节点计算模型

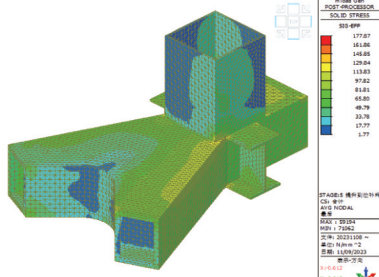
Fig. 15 Calculation model of transmission truss joints



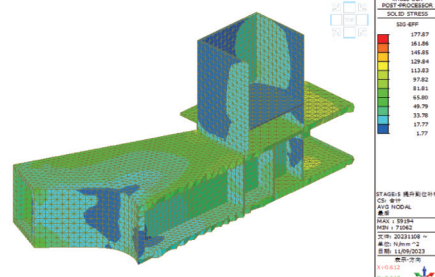
a) 节点1 von Mises整体云图(单位: MPa)



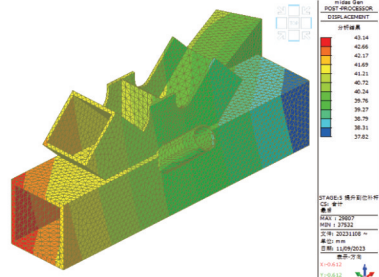
b) 节点1 von Mises剖切云图(单位: MPa)



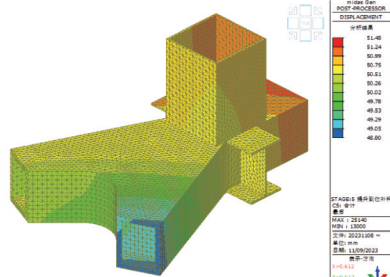
c) 节点2 von Mises整体云图(单位: MPa)



d) 节点2 von Mises剖切云图(单位: MPa)



e) 节点1变形云图(单位: mm)



f) 节点2变形云图(单位: mm)

图16 传力桁架节点计算结果

Fig. 16 Calculation results of transmission truss joints

3 施工仿真分析与监测对比

3.1 仿真分析

基于上述方案2,利用有限元软件 Midas Gen 与 SAP 2000 分别进行第一阶段提升(图 17a))、第一阶段补杆合龙(图 17b))、第二阶段整体提升(图 17c))、第二阶段补杆合龙(图 17d))、整体卸载(图 17e))的施工全过程仿真分析,并通过将分析结果与监测结果进行对比,充分论证超大跨度双跨机库无临时支点提升施工的可行性。

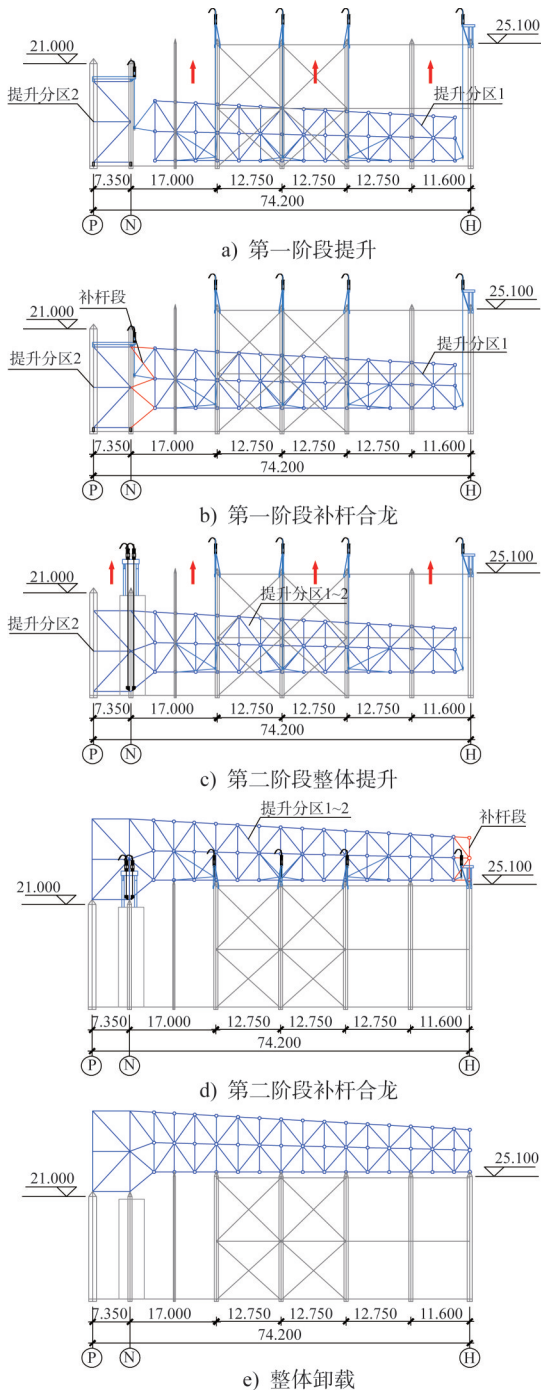


图 17 施工仿真分析流程(单位:m)

Fig. 17 Construction simulation analysis process(unit:m)

施工过程分析包含荷载如下:钢结构自重、屋面檩条重量、大门墙架重量、机电管道重量、马道荷载。

3.2 仿真分析控制指标

3.2.1 挠度控制指标

维修机库钢屋盖提升施工状态与结构一次成型状态受力有所不同,因此采用拼装预起拱进行挠度控制,预起拱控制原则如下:钢结构施工完成后,在结构使用状态下屋盖成水平状态。

因施工仿真分析无法完全将所有荷载按实际位置进行考虑,按施工模拟最后一个施工步后结构下挠变形值的 110% 进行预起拱。

钢结构施工完成卸载后,在成型后的屋盖结构上考虑屋面荷载 $80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和大门墙面荷载 $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,此时施工模拟最后一个施工步后结构变形即为预起拱数值。

3.2.2 构件长细比控制指标

在施工全过程分析中,构件长细比控制指标如表 2 所示。

表 2 构件长细比控制指标^[13]

Table 2 Control indexes of slenderness ratio

杆件类型	杆件分类	杆件受拉	杆件受压
网架、立体桁架	一般杆件	300	180
	支座附近杆件	250	

3.2.3 构件应力比控制指标

提升施工阶段考虑 1.5 倍安全系数,卸载施工阶段考虑 1.3 倍安全系数^[11-12],各杆件应力比不大于 0.9。

3.3 仿真分析结果

3.3.1 变形

图 18 给出结构整体卸载完成后,结构的竖向变形位移云图。从图中可以看出,两个有限元软件计算结果一致,可以互相验证分析结果的准确性。整体卸载完成后,结构变形最大位置发生在大门桁架跨中相邻网架位置处,最大变形为 -166 mm ,原因是第一阶段提升竖向变形与第二阶段提升竖向变形累积的结果。

3.3.2 应力比

在全过程施工仿真分析中,结构在第一阶段提升、第二阶段提升、整体卸载 3 个施工步下,结构杆件应力比云图如图 19 所示,两个软件关键杆件应力比对比结果见表 3。

由应力比云图及表 3 可知,两个软件应力比计算结果几乎一致,在第二阶段提升施工步中,最大应力比杆件

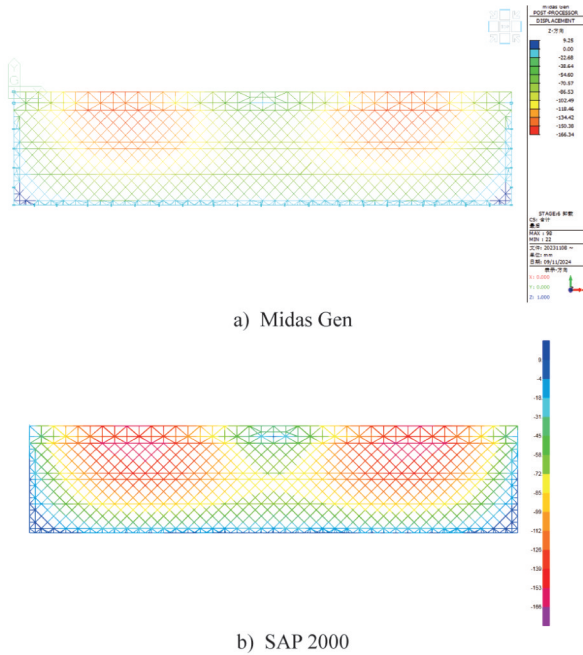


图 18 整体卸载后结构竖向位移云图(单位:mm)
 Fig. 18 Contour of vertical displacement of the structure after overall unloading (unit:mm)

两软件计算结果差值仅为1.2%，可以相互验证分析结果的准确性，每个施工阶段各杆件应力比均小于0.9，表明结构在提升施工阶段拥有足够的安全储备，整个提升施工过程安全可靠，满足规范和设计要求。

3.4 理论分析与实施阶段监测对比

施工过程中，对N轴大门桁架下弦杆跨中位置及大厅网架跨中下弦球处进行竖向位移监测，并对关键杆件1~4及传力桁架关键杆件5~6进行应力监测，关键杆件1~4位置见前文所述，传力桁架关键杆件5~6位置见图20。

各施工阶段桁架跨中竖向变形与理论变形对比见图21，各关键杆件应力实测值与理论值对比见图22，实施阶段跨中无临时支点提升照片见图23。

由图21可知，全过程施工模拟结构竖向变形分析与实测结果的变化规律一致。由于提升施工阶段分析中考虑了附属结构荷载，但在实际施工中，该部分附属结构未完全进行安装，因此实测的各施工阶段结构竖向位移均较理论结果小。

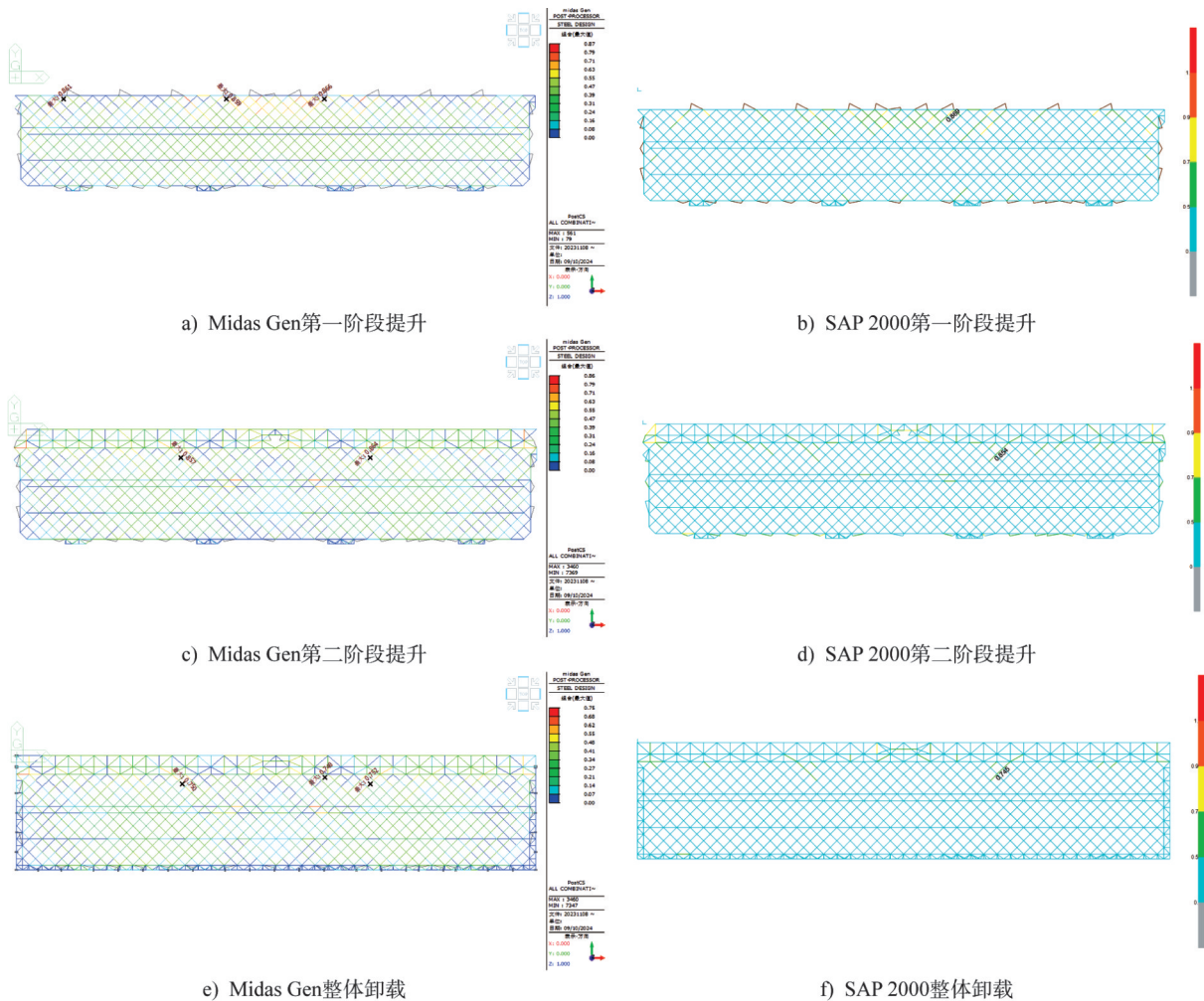


图 19 关键施工阶段结构应力比云图
 Fig. 19 Contour of structural stress ratios during critical construction stages

表3 最大应力对比表

Table 3 Comparison of maximum stress ratios

工况	Midas Gen 计算 应力比	SAP 2000 计算 应力比	计算应力 比差值
第一阶段提升	0.866	0.869	0.003
第二阶段提升	0.864	0.854	-0.010
卸载	0.752	0.745	-0.007

注:应力比为有限元分析软件输出结果,差值为采用SAP2000软件计算应力比减去采用Midas Gen软件计算应力比。

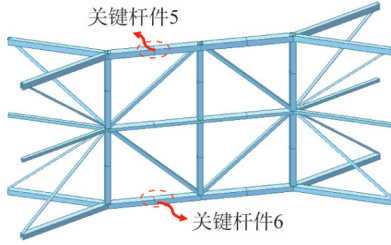
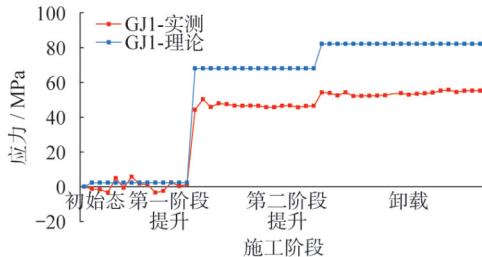


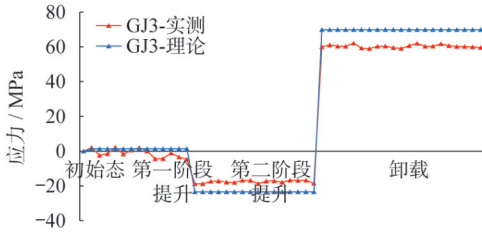
图20 传力桁架关键杆件位置图

Fig. 20 Location diagram of key members of the transmission truss

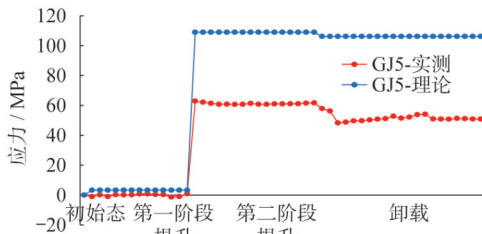
由图22可知,全过程施工模拟大门桁架关键杆件应力计算结果与实测结果的变化规律基本一致。而在实际施工中,由于计算中考虑的附属结构荷载在提升施工前未完全安装,所以实测的各施工阶段结构杆件应力均较



a) 关键杆件1



c) 关键杆件3



e) 关键杆件5

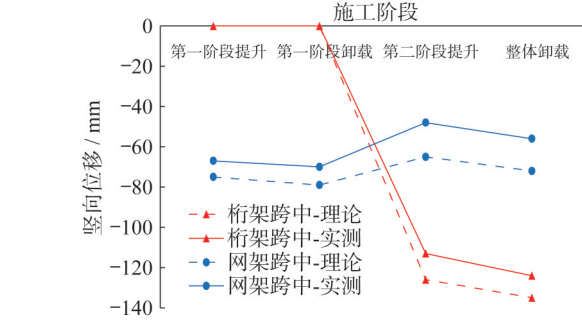
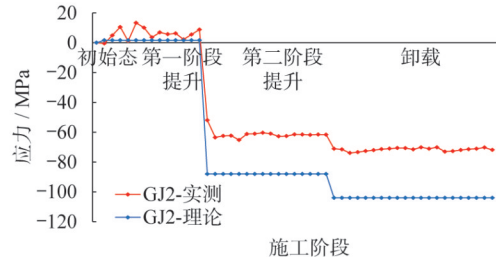


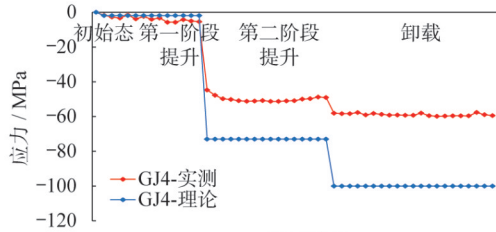
图21 各施工阶段结构竖向变形

Fig. 21 Vertical deformation of structures in each construction stage

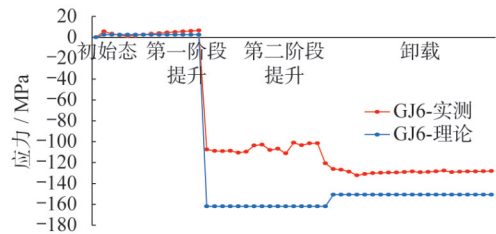
理论结果小。关键杆件6在整体卸载后,杆件应力相较于上一阶段有所增大,而理论计算结果中该杆件在整体卸载后变化趋势为有所减小,造成此现象的原因:为简化理论计算分析,当计算至卸载施工步时,在中柱提升点设置的临时加固杆在分析软件中直接钝化,此时内侧大门桁架参与了小部分力的传递,因此传力桁架下弦杆受力有所减小。但实际卸载过程中,液压提升器卸载和临时加强杆件的拆除不可能同时发生,由于临时杆件的存在,结构的传力模式有所改变,因此传力桁架杆件应力有所增加,但增加幅度较小,增幅约8%。



b) 关键杆件2



d) 关键杆件4



f) 关键杆件6

图22 各施工阶段关键杆件应力对比

Fig. 22 Comparison of stress of key members in each construction stage



图 23 跨中无支撑提升现场施工

Fig. 23 On site construction without support for mid-span lifting

在施工过程中,杆件的应力水平较低,相较于杆件自身屈服强度有较大的安全富余量。

通过施工中的现场监测与工程的顺利实施,进一步验证了超大跨度双跨机库大门桁架局部加强及其无临时支点提升施工技术的可行性。

4 结论

本文基于厦门太古机库项目,对超大跨度双跨机库钢屋盖施工关键技术进行探索研究,可以得出以下结论:

(1) 通过对双跨机库钢屋盖施工的特点及难点进行分析,结合软弱地基区域的施工难点,从安全性、可行性、经济性等多因素综合对比了 3 种提升方案,最终采用增设四节间双 Y 传力桁架局部加固大门桁架的方式,来实现无临时支点的提升施工。

(2) 选择原结构支承柱位置作为提升点,可以保证结构在提升状态的受力情况与实际使用状态的受力情况基本吻合,该项目在整体提升阶段均利用原结构支撑柱设置提升点。

(3) 采用了两种通用有限元分析软件进行全过程施工仿真分析,并相互验证了计算结果的可靠性;在施工过程中对关键构件应力及大门桁架跨中变形进行监测,施工模拟的关键构件应力及跨中竖向变形变化规律与监测值总体保持一致,施工完成态位形与设计初始态位形吻合,很好地验证了双跨机库大跨屋盖无支撑整体提升施工技术的合理性。

(4) 针对超大跨双跨机库,本文在行业内首次提出采用局部增设加强桁架、取消大门开口边位置临时支点的方式进行整体提升,该施工技术可以保障软弱地基区域项目的顺利实施,提高现场施工的便利性,降低工程造价,实现绿色建造,可为今后同类工程施工提供参考。

参考文献:

[1] 薛素铎,王天柱,赵伯友,等. 大跨度飞机维修机库研究现状与展望[C]//第十七届空间结构学术会议论文集. 西安:[出版者不详],2018.

XUE Suduo, WANG Tianzhu, ZHAO Boyou, et al. Research status and prospects of large-span airport maintenance hangars [C]//Proceedings of the 17th Space Structure Academic Conference. Xi'an: [s. n.], 2018. (in Chinese)

- [2] 韩宏武. 维修机库网架提升方法决策研究[J]. 建筑科技, 2022, 6(4): 110-112. DOI:10.3969/j.issn.1007-046X.2022.04.034.
- HAN Hongwu. Decision-making study on maintenance hangar grid lifting methods [J]. Build Technology, 2022, 6(4): 110-112. DOI:10.3969/j.issn.1007-046X.2022.04.034. (in Chinese)
- [3] 李会军,何双华,龙婷婷. 节点刚度对含有缺陷杆件网架稳定性的影响[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(4): 10-20, 35. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.04.002.
- LI Huijun, HE Shuanghua, LONG Tingting. Effect of joint stiffness on the stability of space truss with imperfect members [J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(4): 10-20, 35. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.04.002. (in Chinese)
- [4] 崔嘉慧,邵冰,邹海涛,等. 不同施工工艺下周边支承网架结构附加应力分布及安全性研究[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(6): 85-96. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.010.
- CUI Jiahui, SHAO Bing, ZOU Haitao, et al. A study on the additional stress distribution and safety of peripheral supporting grid structure under different construction technologies [J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(6): 85-96. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.010. (in Chinese)
- [5] 蒋寿时,何沛德,张永才,等. 大型维修机库屋盖结构整体提升施工与设计[C]//第六届空间结构学术会议论文集. 北京:地震出版社,1996.
- JIANG Shoushi, HE Peide, ZHANG Yongcai, et al. Construction and design of overall lifting of roof structure for large maintenance hangar [C]//Proceedings of the 6th Space Structure Academic Conference. Beijing: Seismological Press, 1996. (in Chinese)
- [6] 陈慧勇,冀晓雪,张树海. 大跨度飞机拆解机库提升施工技术[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(6): 2-4. DOI:10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2023.06.002. (in Chinese)
- CHEN Huiyong, JI Xiaoxue, ZHANG Shuhai. Lifting construction technology of large-span aircraft dismantling hangar [J]. China Construction Metal Structure, 2023, 22(6): 2-4. DOI:10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2023.06.002. (in Chinese)
- [7] 邹建磊,马喆,王小瑞. 首都机场 A380 机库工程整体提升支撑体系施工技术[J]. 建筑技术, 2008, 39(10): 772-775. DOI:10.3969/j.issn.1000-4726.2008.10.012.
- ZOU Jianlei, MA Zhe, WANG Xiaorui. Construction technology of supporting system for whole lifting in capital airport A380 aircraft hangar [J]. Architecture Technology,

- 2008, 39(10): 772-775. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4726.2008.10.012. (in Chinese)
- [8] 高玉兰, 王益民, 董巍, 等. 新型承重支撑体系在北京大兴国际机场南航机库屋盖施工中的应用[J]. 建筑施工, 2020, 42(4): 478-480. DOI:10.14144/j.cnki.jzsg.2020.04.003. GAO Yulan, WANG Yimin, DONG Wei, et al. Application of new load-bearing support system in roof construction of China southern airline hangar at Beijing Daxing International Airport [J]. Building Construction, 2020, 42(4): 478-480. DOI:10.14144/j.cnki.jzsg.2020.04.003. (in Chinese)
- [9] 陈冬冬, 姚刚, 袁旭东, 等. 上海浦东波音机库屋盖整体提升施工技术[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(4): 650-653. CHEN Dongdong, YAO Gang, YUAN Xudong, et al. Integral lifting technology of boeing hangar roof at Pudong Airport [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, 29(4): 650-653. (in Chinese)
- [10] GB 55006—2021 钢结构通用规范[S]. GB 55006—2021 General code for steel structures[S]. (in Chinese)
- [11] GB 50068—2018 建筑结构可靠性设计统一标准[S]. GB 50068—2018 Unified standard for reliability design of building structures[S]. (in Chinese)
- [12] GB 51162—2016 重型结构和设备整体提升技术规范[S]. GB 51162—2016 Technical code for integral lifting of heavy structure and equipment[S]. (in Chinese)
- [13] JGJ 7—2010 空间网格结构技术规程[S]. JGJ 7—2010 Technical specification for space frame structures[S]. (in Chinese)