

DOI: 10.7672/sjgs2026020001

超高层塔楼连廊及下挂钢结构整体累积提升 施工方案优化研究*

王成武¹, 侯彦果², 王晓冬¹, 单宏伟¹, 贾东³, 傅强³, 张志超³, 闻陈宝²

(1. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南长沙 410000; 2. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 3. 中建五局华南建设有限公司, 广东深圳 518000)

[摘要] 超高层复杂钢结构的力态与形态控制是施工过程中的关键问题。施工结构的位形和力学特征取决于施工方案的合理性与优化程度, 因此合理的施工方案是精准化施工的基础, 可大大简化设计和施工流程。以深超总C塔工程为案例, 基于一体化协同分析, 系统优化连廊及下挂钢结构的整体累积提升与合龙施工过程。首先, 提出了4步、5步和6步提升法, 对比分析不同方案对结构变形和受力的影响规律; 其次, 揭示了提升点高度位置与结构应力、变形的关系, 据此确定最优提升点位; 最后, 通过对比两种合龙方案的后补构件, 量化评估了合龙顺序对结构力学性能的影响。

[关键词] 高层建筑; 钢结构; 连廊; 提升; 合龙; 优化

[中图分类号] TU758

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0001-07

Optimization Study on Overall Cumulative Lifting Construction Scheme for Corridors and Under-hung Structures of Super High-rise Towers

WANG Chengwu¹, HOU Yanguo², WANG Xiaodong¹, SHAN Hongwei¹, JIA Dong³, FU Qiang³, ZHANG Zhichao³, WEN Chenbao²

(1. China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China;

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. China Construction Fifth Division Southern Construction Subsidiary Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: The force and shape control of super high-rise complex steel structures is the key problem in the construction process. The configuration and mechanical characteristics of the construction structure depend on the rationality and optimization of the construction scheme. Therefore, a reasonable construction scheme is the basis of precise construction, which can greatly simplify the construction and design process. Taking the Tower C project of the Shenzhen Bay Super Headquarters Base as an example, based on the integrated collaborative analysis, the overall cumulative lifting and closure construction process of the corridor and the underlying steel structure are systematically optimized. Firstly, four-step, five-step, and six-step lifting methods are proposed, and the influence of different schemes on structural deformation and stress was compared and analyzed. Secondly, the relationship between the height of the lifting point and the structural stress and deformation was revealed, and the optimal lifting point was determined. Finally, the influence of the closure sequence on the mechanical properties of the structure was quantitatively evaluated by comparing the post-filled components of the two closure schemes.

* 国家自然科学基金面上项目(52378164); 河北省科技计划资助项目(22284501Z); 中建五局重点研发项目; 超高层项目智能建造成套关键技术研发及应用(CSCEC5B-2024-5); 中施企协青年课题: 基于结构检测的复杂连廊施工安全控制方法研究(2024-B-011); 中施企协青年课题: 超重大跨度连廊及上托下挂幕墙异型钢结构高空施工关键技术(2024-B-008)

[作者简介] 王成武, 正高级工程师, E-mail: 185088043@qq.com

[收稿日期] 2025-06-15

Keywords: tall buildings; steel structures; corridors; lifting; closure; optimization

0 引言

针对复杂大型连廊结构,整体提升法^[1-5]是一种相对普适且高效的施工技术。该技术采用地面拼装与整体液压同步提升系统相结合的方式,将目标结构精确、安全地提升至设计标高,随后进行后补构件的安装与连接,从而完成整体结构施工。值得注意的是,不同的提升与合龙策略对结构的应力分布与变形特征影响显著。施工结构的位形和力学特性与施工方案的合理性和优化程度密切相关。因此,制订科学合理的施工方案是实现精准化施工不可或缺的前提,它不仅能显著简化施工及设计流程,更能有效提升工程质量和效率

在提升安装精度方面,闫明婷等^[6]采用反顶和高空补杆技术进行优化;郑文锦等^[3]和王峰等^[7]基于混凝土楼板刚度形成过程,通过变形预调技术对高位连廊成型态进行修正,以确保其达到设计位形;叶冬晨等^[8]通过施加水平荷载以抵消塔楼变形,从而确保连廊对接精度。众所周知,合理提升吊装方案是实现高精度施工的前提条件。马云峰等^[9]针对高层钢结构连廊吊装,提出了分层、分片吊装方案及相应的控制措施;张佳健等^[10]对大跨度屋面桁架吊装进行分析,优化了吊点布置并比较了不同方案的经济性。

本文深入剖析了施工场地条件、焊接工艺难度、施工过程的安全性以及结构的受力和变形要求,并据此对提升和合龙施工方案进行了针对性优化。基于 MIDAS 有限元软件,对整体累积提升过程进行了协同仿真分析,着重研究了不同提升和合龙方案下结构的变形和应力分布特征。通过对比分析 3 种提升方法、2 种提升点位设置方案以及 2 种合龙方案在施工便捷性、结构变形和应力方面的优势,最终确定了最优提升方案。

1 工程概况

1.1 项目概况与结构特点

深超总 C 塔项目总用钢量 7.2 万 t,建筑面积 54.74 万 m²,其中 A 座塔楼位于东侧,高 393.2m, B 座塔楼位于西侧,高 329m,如图 1 所示。2 座塔楼间通过空中连廊连接,连廊桁架上托 1 个巨大的共享空间,连廊下方悬挂钢结构楼层及其他钢结构体系。在塔楼的底部区域,围绕核心筒设置裙摆钢结构及其幕墙体系。

在结构设计方面,2 座塔楼均采用了核心筒与外框钢管混凝土柱相结合的混合结构体系。在相

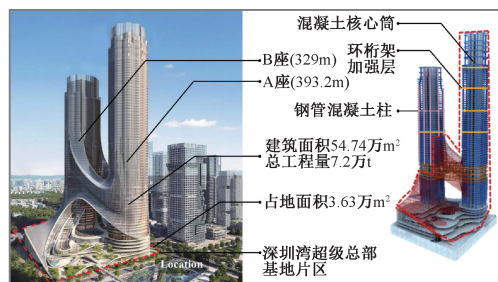


图 1 项目整体结构效果

Fig. 1 Overall structural effect of the project

同高度,两塔之间通过 2 个独立的巨型连廊相连,使两塔主体结构相互支撑,共同承担风荷载和地震作用。

1.2 连廊、上托和下挂区概况

连廊、上托以及下挂区的分区和结构布置如图 2 所示。连廊(见图 2b)位于塔楼 19~23 层之间的南北两侧,采用大跨度外扩弧形连廊实现两塔楼的连接。连廊采用 3 层结构体系,其中 19 层为吊挂层,20~23 层为桁架层,整体连廊结构高度为 24.9m。单侧连廊自重约 2 400t,两侧总重约 4 800t,结构形式相同且相互独立。连廊内侧跨度 54m,外侧跨度 80m,位于高度 119.15m 的位置。南、北侧连廊靠近 B 座位置设置拱桥结构,连廊的内、外侧主桁架共划分为 6 个节间,节间长 12.8~14m。

上托区幕墙钢构一体化结构(见图 2c)主要由上屋脊杆、连廊中部的隔断立柱、折角管桁架(外侧),管桁架(内侧)以及位于 30 层的抗风桁架组成,整体呈西高东低走势,总高 80m。上托结构管桁架下端通过销轴连接于 23 层,上端与屋脊杆销轴连接。屋脊杆连接至西塔 40 层(包括桁架结构)与东塔 29 层。

下挂区悬挂于连廊下端(见图 2d),两侧与东、西塔连接,整体呈西高东低走势。下挂结构主要通过连廊结构层外侧水平边梁设置的销轴连接节点与连廊结构进行连接。下挂区钢结构可分为下挂区幕墙钢构一体化结构(下挂结构与东塔在 13~20 层连接,其中南侧下挂在西塔 19 层与裙摆连接,北侧下挂与西塔在 16~20 层连接),这 2 个结构受力相对独立,材质均为 Q355B。

2 提升方案与有限元模型

2.1 提升方案比选

针对连廊、上托及下挂钢结构的提升施工,本研究提出 3 种方案,从施工流程、风险控制、结构受

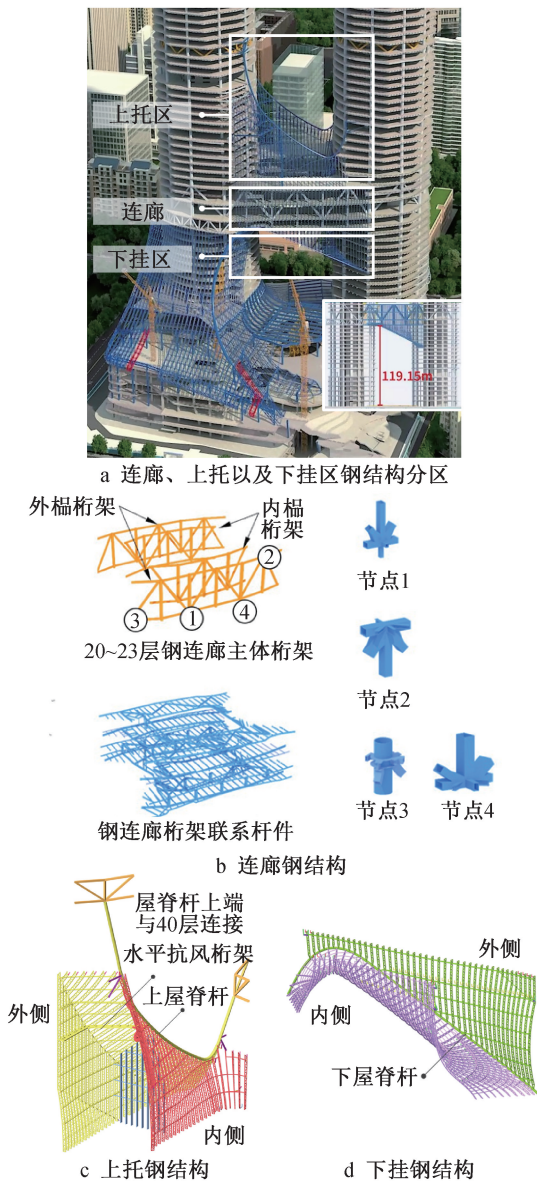


图2 连廊、下挂区以及上托区钢结构

Fig. 2 Steel structure of the corridor, upper and under-hung area

力及变形控制等方面进行对比分析。

1) 原位拼装+塔式起重机吊装

即利用塔式起重机把连廊、上托及下挂结构构件吊到设计位置安装就位。为此,需要高空设置临时支撑胎架,高空拼装与焊接作业量大,导致施工安全风险显著增加。支撑胎架需要较大刚度,其设计方案需要仔细研究,可优选索撑结构等,不仅满足施工阶段变形要求,也能降低施工成本。结构设计上,考虑到连廊桁架为上托及下挂结构的主要支撑体系,可优选吊装连廊桁架,再分别安装下挂与上托结构的安装顺序。

2) 部分地面拼装+分阶段提升

即连廊及上托钢结构在地面拼装、连廊混凝土

楼板浇筑,随后进行分阶段提升。在连廊与上托钢结构提升到一定高度后,再分阶段拼装下挂钢结构,最后将所有结构提升至设计位置。此外,后补构件的合龙顺序需要仿真分析确定,使得提升成型内力与设计要求大致相同,否则,还需要提升结构补强设计。这一施工方案大大减少了高空拼装与焊接作业量,但由于提升质量剧增,增加了整体提升难度与安装风险。

3) 连廊与下挂钢结构累积整体提升+上托钢结构原位安装

首先在地面拼装连廊结构,提升到一定高度后分阶段拼装下挂钢结构,最终将所有钢结构提升至设计位置,之后浇筑混凝土楼板,最后在顶部连廊混凝土楼面原位拼装上托钢结构。这一施工方案综合了方案2和方案1的优点,高空焊接作业量少,分阶段提升释放了安全风险。此外,先提升连廊及其下挂钢结构、再原位安装上托钢结构,更能使得提升施工成型态与结构设计受力状态符合。因此,综合考虑场地条件、施工技术、结构安全、措施费用等因素,选用C塔连廊及其上托、下挂钢结构的安装方案,对其进行仿真模拟分析与计算。

2.2 有限元模型

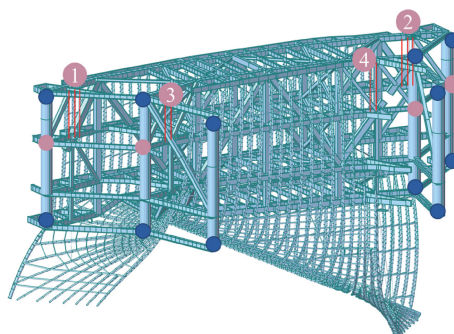
连廊有限元模型如图3所示。其中,图3a描述了主体结构边界条件和网格,边界约束主要设置在提升架上,分别设置12个刚性约束,即约束所有平动和转动位移(蓝色点);设置4个平动约束,约束面内平动(红色点);此外,连廊中间约束非共线的3个点平动位移,防止约束不足产生刚体位移。

结构材料为Q460和Q355钢材,钢材弹性模量设置为206GPa,泊松比为0.3,密度为7850kg/m³。图3b和图3c中红线标记为Q460和钢管混凝土构件,其余未标记构件为Q355钢材。

连廊和下挂区主体采用梁单元模拟,提升索(图3a红线所示,索组标号1,2,3,4)和下挂区临时加强钢绞线采用桁架单元模拟,施工优化计算模型不考虑混凝土楼板。需要注意,此处为整体模型细节介绍,不同优化方案对应的数值模型参照对应小节的描述。

3 连廊和下挂钢结构分步提升优化

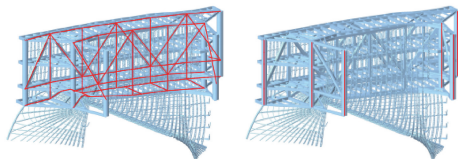
考虑到实际施工场地、施工效率、结构变形和应力变化等因素,提出3种提升施工方案进行比选。方案1为6步提升,即连廊桁架地面整体拼装、吊挂单元逐一提升完成,如图4所示;方案2为5步提升,即连廊桁架、连廊吊挂层以及吊挂单元逐一提升完成,如图5所示;方案3为4步提升,即2层连



● 3个平动自由度与3个转动自由度(x, y, z, Rotx, Roty, Rotz)

● 2个平动自由度(x, y)

a 网格与边界



b Q460构件

c 钢管混凝土柱

图3 连廊有限元模型

Fig.3 Finite element model of the corridor

廊逐一吊装、连廊吊挂层以及吊挂单元逐一提升完成,如图6所示。

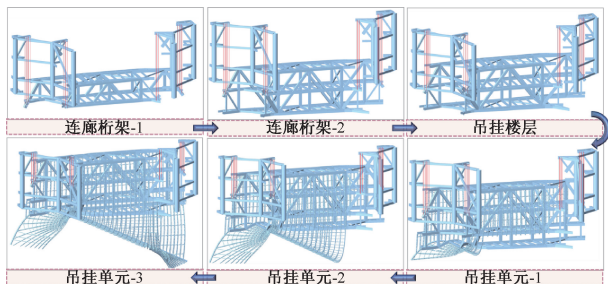


图4 6步提升法

Fig.4 Six-step method for lifting structures

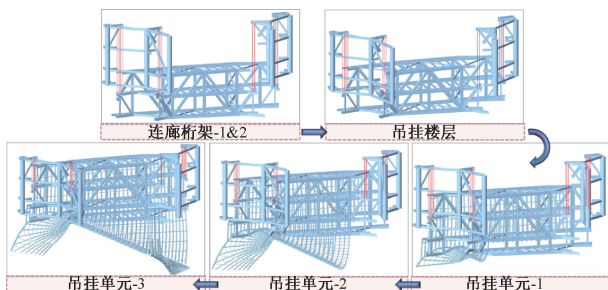


图5 5步提升法

Fig.5 Five-step method for lifting structures

3.1 提升方案及特点介绍

1)6步提升法分为6个主要施工步骤,采用拼装-提升-拼装策略。首先,分别提升2层连廊;在连廊提升完成后,提升连廊吊挂层;最后,依次提升各吊挂单元,确保结构的完整性和稳定性。

2)5步提升法分为5个主要施工步骤。首先一

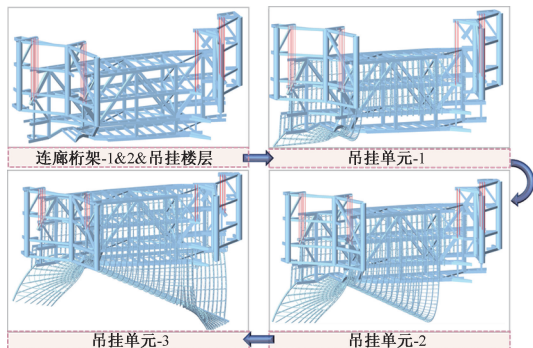


图6 4步提升法

Fig.6 Four-step method for lifting structures

次性提升2层连廊桁架,接着提升吊挂层,最后依次提升各吊挂单元,直到完成整体结构的安装。

3)4步提升法分为4个主要施工步骤。连廊桁架和吊挂层在拼装平台上一次性拼装完成,之后按照顺序逐一提升吊挂单元,直至所有单元安装完成。

上述3种提升方案在空间利用、高空作业量、提升结构刚度强弱、适用场景等方面各有优缺点,这里不再赘述。考虑C塔施工场地条件、提升结构刚度与内力变化、施工进度及其成本等因素,连廊及其下挂钢结构采用4步提升法进行安装。

3.2 基于力学性能的提升方案对比

提升计算结果如图7所示,6步提升法竖向变形是所有方法中最大的,连廊和下挂区施工完成时,位移达到176mm,4步提升法和5步提升法最终位移接近,均为49mm。这是由于6步提升法在提升单层连廊时,结构刚度很弱,初始变形达到138mm,考虑后续施工位移叠加,需要额外加强刚度。在连廊提升完成前,5步提升法位移略小于4步提升法,这是由于5步提升法吊挂层的变形是基于连廊桁架变形叠加自重作用,而4步提升法是在连廊桁架和吊挂层形成完整刚度后共同抵抗自重荷载作用,所以两者变形存在略微差异。但是随着其他荷载增加,最终刚度共同作用,使得2种提升方案刚度逐渐接近,最大变形均为49mm,出现在吊挂单元悬挑的位置。图7右侧列出完整连廊提升完成时的变形和应力状态。可知6步提升法连廊的临时加强构件应力显著大于4步和5步提升法,最大拉应力达到665MPa,最大压应力达到310MPa,而其他2种方案最大拉应力约92MPa,最大压应力约120MPa。为解决这一问题,需增加临时加强构件,以提升整体刚度,减小初始位移,确保最终结构形态与设计状态的一致性。

3种提升方案索的内力变化情况如图8所示。

6步提升法中最大索应力为689MPa,而4步和5步提升法最大索应力相近,分别为591,600MPa。连廊和下挂单元总重2 539.4t,全部依靠4组索传递给提升架。3种方案中对应组的索力相差不大(见图8所示表格总和),而每组索中单根索的内力相差可能较大。对于4步和5步提升法,索组1和2中索力差相近,约300kN;而6步提升法中,索组1和2中索力相差达到875kN,是4步和5步提升法的近3倍。由此可见,4步和5步提升法索力分布相对更均匀,索间内力差异小。

4 连廊提升吊点高度优化分析

提升点位置会影响提升结构的变形、应力以及提升索的内力。列出2种提升点位置如图9所示,方案1为提升点在连廊1层(即施工方案),方案2为提升点在连廊2层。

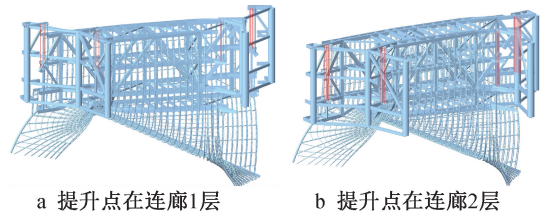


图9 提升点位置

Fig. 9 Location of lifting points

对比分析结果如图10所示,连廊2层吊点方案的最大位移(186mm)较连廊1层方案(145mm)增大28.3%,这主要由于索长增加导致变形增大。值得注意的是,2种方案的相对位移基本一致(连廊1层吊点方案为107mm,连廊2层吊点方案为109mm),表明吊点高度主要影响整体位移,对结构内部变形分布影响较小。

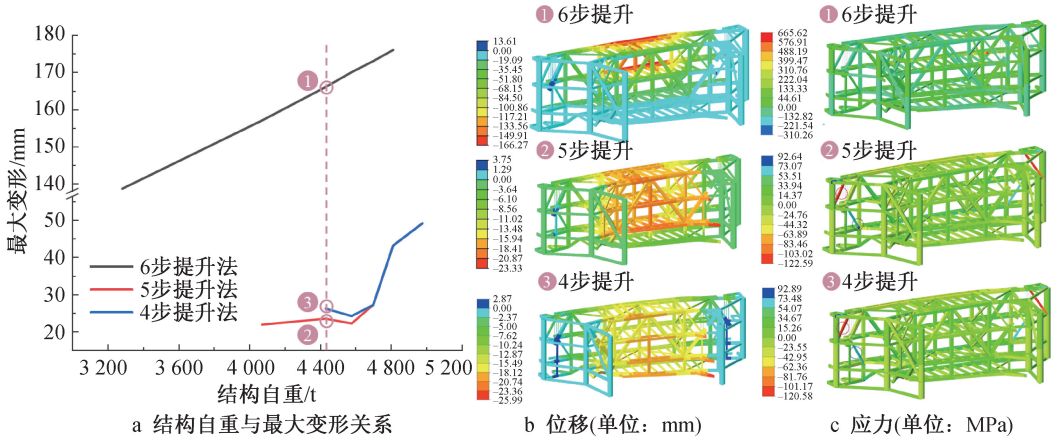
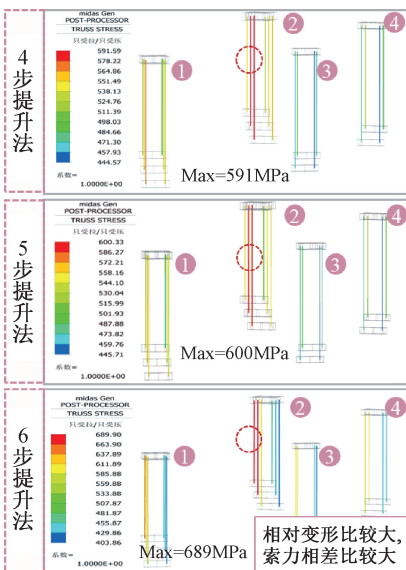


图7 3种提升方案竖向位移与应力对比

Fig. 7 Comparison of the vertical displacement and stress of the three lifting schemes



索号/定位	1 (t)	2 (t)	3 (t)	4 (t)	5 (t)	6 (t)	总和 (t)
①	173.1	165.0	162.3	171.1	148.9	158.8	979.2
②	171.7	178.7	179.6	169.5	157.2	166.1	1 022.8
③	65.2	62.4	66.9	70.1			264.6
④	63.8	67.1	69.6	72.3			272.8

索号/定位	1 (t)	2 (t)	3 (t)	4 (t)	5 (t)	6 (t)	总和 (t)
①	173.0	164.1	161.6	171.4	148.7	159.5	978.2
②	168.5	180.4	182.3	166.6	154.9	169.7	1 022.4
③	65.7	62.6	67.0	70.6			265.8
④	63.7	67.3	69.4	72.5			273.0

索号/定位	1 (t)	2 (t)	3 (t)	4 (t)	5 (t)	6 (t)	总和 (t)
①	172.9	124.3	135.3	188.8	139.2	199.5	959.9
②	128.1	185.6	204.3	137.1	139.3	211.5	1 005.9
③	82.1	60.9	59.1	82.9			285.0
④	60.7	82.2	61.2	84.6			288.7

图8 3种提升方案提升索力对比

Fig. 8 Comparison of the cable forces of the three lifting schemes

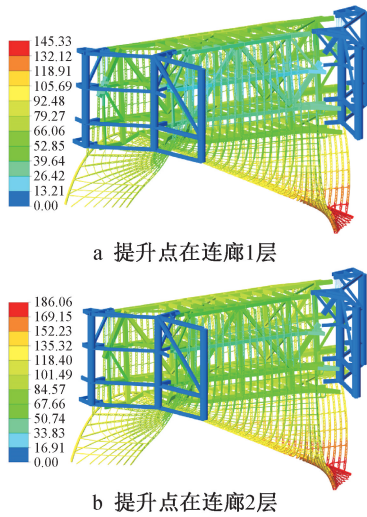


图 10 不同吊点高度位移对比(单位:mm)

Fig. 10 Comparison of displacements for varying lifting points (unit:mm)

对比分析表明,提升点位置显著影响结构应力分布,尤其是局部位置的构件内力,但基本不影响索力(见图 11、表 1)。连廊 2 层吊点方案的最大拉应力(188MPa)和压应力(236.5MPa)分别比连廊 1 层吊点方案高 24.5% (151MPa) 和 40.1% (168.5MPa),且最大压应力位置从临时斜撑转移至连廊边柱。表 1 表明提升点位置对索力的影响可忽略不计,表中 TSS 代表提升索,1~4 代表索组位置(见图 3)。综合应力、变形及经济性分析,采用连廊 1 层吊点位置作为提升方案更具优势。

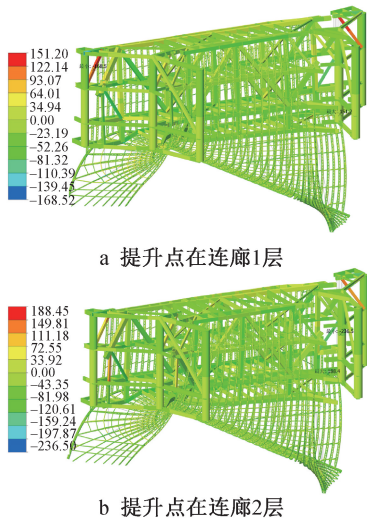


图 11 不同吊点高度应力对比(单位:MPa)

Fig. 11 Comparison of the stresses for varying lifting points (unit:MPa)

5 连廊和下挂区后补构件合龙顺序研究

连廊和下挂钢结构合龙顺序会显著影响结构受力特性,本研究提出 2 种连廊和下挂区合龙方法,

表 1 不同提升点索力比

Table 1 Ratio of the cable force for varying lifting points

索编号	索组			
	TSS1	TSS2	TSS3	TSS4
1	0.91	0.90	0.98	0.92
2	0.89	0.91	0.94	0.98
3	0.98	0.99	1.05	1.04
4	1.00	0.99	1.10	1.10
5	1.08	1.08	—	—
6	1.10	1.10	—	—
均值	0.99	1.00	1.02	1.01

第 1 种为部分合龙-卸载-全部合龙,简称分步合龙,第 2 种为全部合龙-撤索-卸载,简称一次合龙。分步合龙步骤如图 12 所示,具体为:①连接连廊处的后补构件;②撤除提升索;③连接吊挂结构的后补构件和临时加强构件。很显然,此时吊挂结构的后补构件为零应力构件,直至新的荷载施加到结构上。一次合龙具体步骤如图 13 所示,具体为:①连廊和吊挂结构后补构件全部连接;②撤除提升索;③撤除临时加强构件。该方法在撤除提升索后,所有荷载通过后补构件传递到塔楼上。

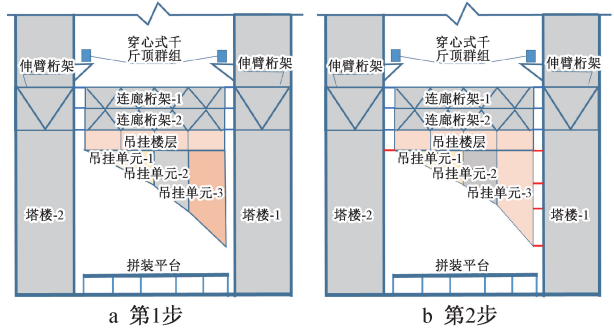


图 12 合龙方案 1

Fig. 12 Closure scheme 1

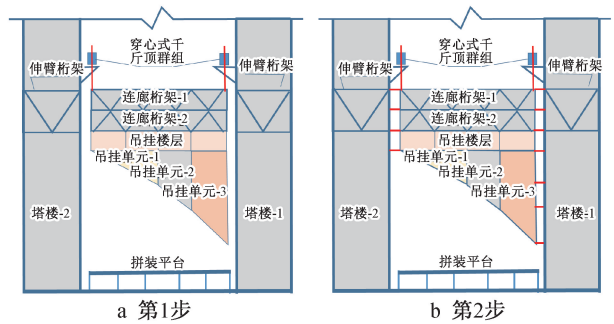


图 13 合龙方案 2

Fig. 13 Closure scheme 2

2 种合龙方案的位移和应力对比如图 14 所示。由图 14 可知,最大位移发生在最后一个施工步;应力最大情况发生在第 2 个施工步。合龙方法 1 的位移最大为 131mm,显著大于方法 2 (最大为 64.2mm),这是由于分步合龙提升索撤离后,吊挂单

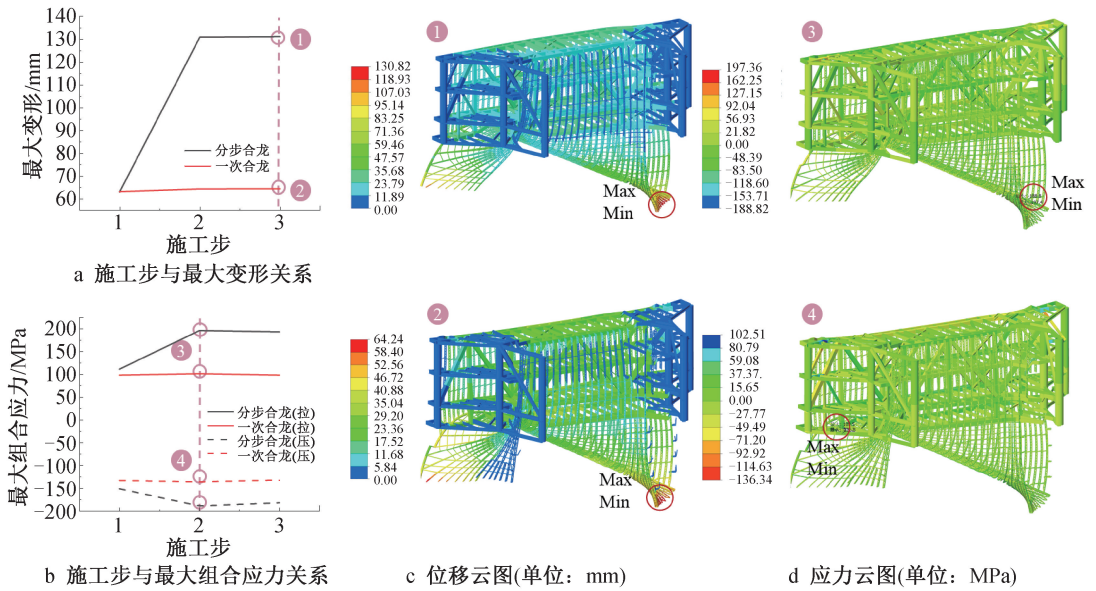


图 14 不同合龙方案应力对比

Fig. 14 Comparison of the stresses for different closure schemes

元自重完全作用在连廊上,因此连廊位移显著增大。这种施工方法要求结构设计时,其结构内力计算要考虑后补构件的连接顺序对荷载叠加效应影响,增加了结构计算难度。而一次合龙则是连廊和吊挂单元完全合龙后,撤除提升索和临时加强构件。合龙是在提升结构变形稳定的基础上进行构件后补,因此合龙完成撤除提升索后的结构与提升过程中结构的变形相差很小。这种施工方法,反映了提升结构与塔楼之间的作用与结构模型一次建立/荷载一次作用的计算结果类似,结构计算较为简单。

计算表明,2种方案结构最大应力均不超过200MPa。需要注意,应力最大情况均发生在第2施工步,即撤除提升索后。提升索卸载后2种合龙方案的连廊桁架应力均为-93~102MPa,这是由于下挂单元和侧挂单元均传力到连廊结构,在撤除提升索前连廊内力已稳定形成,撤除索和安装后补构件不会影响其内力状态。

6 结语

1) 基于拼装-提升-拼装的整体累积提升方案能有效利用空间、显著减少高空作业的原则,计算了4步、5步、6步提升法提升索力、结构内力与变形的变化。计算结果表明,4步提升法具有连廊和下挂钢结构变形小、仰面焊接工作量少、结构应力小等优点,故确定为实际提升方案。

2) 连廊两侧跨度不同,长跨约80m,短跨约54m,长跨变形更加显著,因此在提升过程中需要进行调平处理,即长跨侧索组提升高度需要高于短跨

侧索组,使得整体结构基本在一个平面。

3) 提升到结构设计位置后,后补构件的合龙顺序对连廊及其下挂结构的内力与变形影响较大。连廊2层吊点方案的最大拉应力和压应力分别比连廊1层吊点方案高24.5%和40.1%。考虑材料用量、变形及应力变化,连廊1层吊点方案作为提升方案更加高效。

参考文献:

- [1] 王军,董鹏,李世铎,等.非对称钢结构连廊整体提升过程力学性能研究[J].低温建筑技术,2025,47(2):10-13.
WANG J, DONG P, LI S D, et al. The mechanical properties of asymmetric steel corridor during whole lifting process [J]. Low temperature architecture technology, 2025, 47(2): 10-13.
- [2] 王磊,蔡毅敏.基于变形协调控制的超高层连廊整体提升施工技术研究[J].施工技术(中英文),2024,53(19):127-131.
WANG L, CAI Y M. Research on overall lifting construction technology of ultra-high steel corridor based on deformation coordination control [J]. Construction technology, 2024, 53(19): 127-131.
- [3] 郑文锦,闻陈宝,孟凡光,等.高层建筑高位连廊安装施工技术[J].工业建筑,2024,54(10):240-246.
ZHENG W J, WEN C B, MENG F G, et al. Installation and construction techniques for elevated corridors in high-rise buildings [J]. Industrial construction, 2024, 54(10): 240-246.
- [4] 熊文辉,陆通,彭晶,等.甘露山文创城冰雪综合体高区钢结构累积提升技术[J].施工技术(中英文),2024,53(14):1-8.
XIONG W H, LU T, PENG J, et al. Cumulative lifting technology of high-zone steel structure for ice-snow complex in Ganlu Mountain Literary and Creation City [J]. Construction technology, 2024, 53(14): 1-8.

(下转第14页)