

DOI: 10.7672/sgjs2023200001

# 高层连体结构钢连廊整体提升安全监测研究\*

郭文峰<sup>1</sup>, 叶鹏<sup>2</sup>, 张立<sup>1</sup>, 温沛纲<sup>1</sup>, 陈光泽<sup>1</sup>, 蒋柏旺<sup>1</sup>,  
庞维钊<sup>1</sup>, 周云<sup>2,3</sup>

(1. 保利华南实业有限公司, 广东 佛山 528000; 2. 湖南大学土木工程学院,  
湖南 长沙 410082; 3. 湖南大学工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

[摘要] 超高层复杂连体结构因其独特造型和宏伟气势, 应用越来越广泛。但连廊安装过程具有一定风险, 给施工安全带来巨大挑战。结构健康监测作为评估建筑结构安全的重要手段, 为施工过程中结构安全提供重要保障。依托保利珑门超高层连体结构, 通过合理设计健康安全监测体系, 对结构整体吊装全过程进行应变监测, 分析获得结构在不同起吊关键节点的承载力转换机制。采用有限元方法模拟实际结构边界条件转换及荷载变化, 通过对比计算数据与实测数据, 实现了对结构受力性能和安全状态的评估。

[关键词] 高层建筑; 连廊; 提升; 监测; 有限元分析; 施工技术

[中图分类号] TU974; TU758.11

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2023)20-0001-07

## Safety Monitoring of Integral Lifting of High-rise Connected Structure Steel Corridor

GUO Wenfeng<sup>1</sup>, YE Peng<sup>2</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, WEN Peigang<sup>1</sup>, CHEN Guangze<sup>1</sup>,  
JIANG Baiwang<sup>1</sup>, PANG Weizhao<sup>1</sup>, ZHOU Yun<sup>2,3</sup>

(1. Poly South China Industrial Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China; 3. Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures of Hunan Province, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** Due to its unique shape and grand momentum, the complex connected structures of super high-rise buildings are increasingly widely used. However, the installation process of the corridor carries certain risks and poses a huge challenge to construction safety. As an important means of evaluating the safety of building structures, structural health monitoring provides important guarantees for structural safety during the construction process. By relying on the Poly Longmen super high-rise connected structure and designing a reasonable health and safety monitoring system, strain monitoring is carried out throughout the entire lifting process of the structure, and the bearing capacity conversion mechanism of the structure at different lifting key joints is analyzed and obtained. The finite element method is used to simulate the transformation of actual structural boundary conditions and load changes. By comparing the calculated data with the measured data, the evaluation of the structural stress performance and safety status is achieved.

**Keywords:** tall buildings; corridor; lifting; monitoring; finite element analysis; construction

### 0 引言

高层连体结构是复杂高层建筑结构体系的一种, 通常指2栋或多栋高层建筑之间由若干个连接

体互相连接, 从而达到对建筑造型及使用功能的要求, 并能够满足高层建筑高质量发展要求及消防、观光需求, 但连体结构在造型优美的同时, 给施工带来更大挑战。自20世纪90年代以来, 随着建筑结构形式的不断发展, 各类高层连体结构开始出现, 因独特造型和宏伟气势, 其应用也越来越广泛, 很多成为了地区地标性建筑物, 如“苏州东方之门”

\* 国家自然科学基金(52278306, 51878264); 湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(201912); 湖南省重点研发计划项目(2022SK2096)

[作者简介] 郭文峰, 总经理, 工程师, E-mail: guowf@polycn.com

[通信作者] 叶鹏, 硕士研究生, E-mail: y17368474752@163.com

[收稿日期] 2023-02-20

“中央电视台新楼”“深圳东海超高层公寓”等。根据 JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》<sup>[1]</sup>,刚性连接体可协调结构整体变形,提高结构整体稳定性,在一定程度上减少建筑材料使用。结构健康监测是指利用现场无损监测方式获得结构内部信息,分析包括结构反应在内的各种特征,以便了解结果因损伤或退化造成的改变<sup>[2]</sup>。

目前国内外学者对高层建筑进行结构健康监测的研究不胜枚举,经过广泛应用,证明了结构健康监测技术的可靠性。Ni 等<sup>[3]</sup>对广州塔进行了施工及运营阶段实时健康监测,分析了施工过程中汶川地震及多次台风对结构的影响。Xia 等<sup>[4]</sup>结合施工阶段有限元分析和现场监测,进一步研究了广州塔应力、应变发展过程,为评估结构安全性提供了判断依据。Kijewski 等<sup>[5]</sup>设计了 SmartSync 结构健康监测系统,并对世界最高建筑哈利法塔进行实时监测,对其在风和地震激励下进行了概念验证。Roussel 等<sup>[6]</sup>对新加坡达土岭组屋进行了施工和使用阶段的结构健康监测,采用统计分析方法评估建筑物结构性能。Gao 等<sup>[7]</sup>针对武汉长江航运中心大厦进行了结构变形监测及数值分析,通过对比实测数据与计算数据对有限元模型进行校核并模拟其他施工情况,为超高层复杂连体结构施工阶段的研究提供了新思路。

针对超高层复杂连体结构健康监测研究相对较少,完海鹰等<sup>[8]</sup>对淮北矿业办公中心楼高空连廊重型钢结构整体提升施工技术进行分析,并对施工过程中结构内力、位移进行全面动态实时监控。刘沛等<sup>[9]</sup>对河南建设大厦的“凯旋门”式双塔连体建筑进行分析与设计,采用 ETABS 和 SATWE 对结构进行抗震分析。倪国荣等<sup>[10]</sup>研究分析了多层支座大跨连廊支座反力监测方案,基于有限元模型改进了桁架节点模型,在实际工程中起到了指导作用。叶琳远<sup>[11]</sup>对腾讯滨海大厦进行了钢桁架施工阶段应变监测,对结构关键部位内力状态进行研究。张旭辉等<sup>[12]</sup>对某钢连廊吊装施工过程进行应力监测,分析了边界条件转变及温度变化对连廊应力的影响。

本文以广东佛山保利珑门超高层连体结构为研究对象,设计了结构施工吊装过程中一整套结构健康监测的安全保障策略,通过对连廊结构合理布设应变传感器,获取在吊装阶段结构不同体系转换过程中的应变数据,通过建立有限元模型,对比分析计算数据与实测数据,对结构进行安全性能评估,从而保障连体结构安全提升。

## 1 工程概况

保利珑门位于广东省佛山市,为佛山中轴线位置处地标性建筑物,由 2 幢地上 41 层塔楼组成,建筑高度 141.5m,第 1~2 层底盘相连,2 层以上分为东、西塔楼,在 40、41 层及天面层设置连体结构,跨度约为 46m,属于大跨连体结构。总建筑面积约 11.2 万  $m^2$ ,单塔建筑平面布置规则,平面尺寸为 37.9m×32.3m,采用框支剪力墙结构体系,塔楼 2 层及以下采用型钢柱+剪力墙结构,其余部分采用剪力墙结构。

连体结构主要受力构件为 3 榀钢管混凝土拱,内设 3 层混凝土楼板,总用钢量为 1 200t。吊装前钢管混凝土灌注完毕,总提升量为 1 310t,连廊吊装至结构 40 层后与设置在东、西塔楼上的 3 组牛腿焊接形成门式结构,如图 1 所示。钢连廊屋盖整体结构主要由主桁架、次桁架及钢管混凝土拱组成,在每层钢板上设置抗剪件使混凝土板与钢梁整体受力。

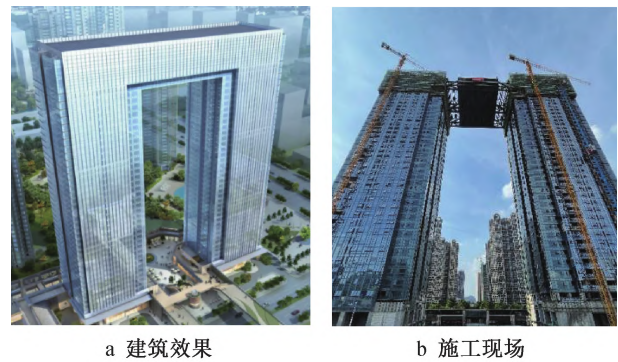


图 1 建筑结构

Fig.1 The building structure

## 2 钢连廊吊装施工方案

钢连廊采用液压同步提升技术整体吊装,即采用地面整体拼装→建立提升系统→整体液压提升→合龙焊接<sup>[13]</sup>施工工艺完成连体结构整体安装。具体流程为:地面钢结构整体拼装→钢连廊预提升 0.5m→钢连廊正式提升→钢连廊提升至对应高度微调就位并临时固定→钢连廊与塔楼焊接并拆除临时性支撑→释放液压索力→浇筑混凝土楼板。

在两塔楼底位置搭设临时拼装平台,完成钢连廊底部拼装,同时在两侧塔楼顶层共设置 6 个提升吊点,每个吊点搭设 2 台同型号液压提升器(TL-HPS-60),每台液压提升器处共有 12 根钢绞线,下吊点布置于被提升连廊下弦杆悬挑端部,为优化钢连廊在吊装过程中的受力性能,降低部分杆件在吊装过程中的受力,在下吊点位置设置临时支撑,如图 2 所示,临时支撑在连廊与塔楼焊接完成后切割拆除。

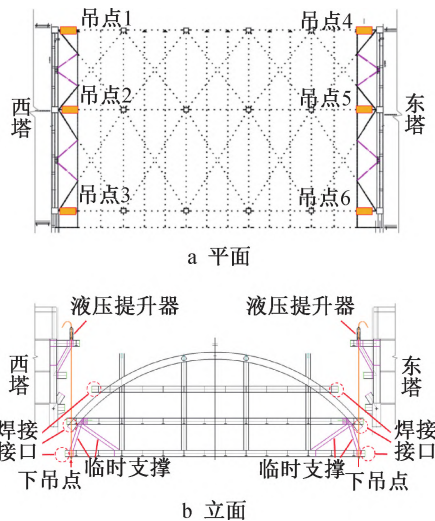


图2 钢连廊吊点布置

Fig.2 Layout of lifting points of the steel corridor

### 3 钢连廊施工全过程监测

#### 3.1 监测系统选择

由于该工程结构具有跨度及自重大、构件类型多及施工过程复杂等特征,因此,监测吊装安全具有重要意义。项目监测目的是保障连廊整体全过程安全提升,对连廊提升过程中引起的结构安全性问题进行评估,预防由施工误差、操作失误引起的结构损伤、失稳甚至破坏。湖南大学大型土木工程结构健康监测研究团队针对本连廊吊装过程,建立了以关键杆件应力水平观测为主的监测系统,健康监测系统由传感器子系统、数据采集和传输子系统、数据处理和管理子系统、结构状态评估子系统4大模块组成,如图3所示。本研究主要介绍超高层连体结构整体提升过程中连廊应变监测内容。

#### 3.2 测点布置

根据初步结构有限元分析及对结构几何特征和受力特点的分析,在钢连廊关键构件上共安装21个JMZX-212HAT型振弦式应变传感器(量程为 $\pm 1\ 500\ \mu\epsilon$ ,灵敏度为 $1\ \mu\epsilon$ ),通过焊接固定于钢结构表面,传感器布置在各施工步骤中内力较大区域(1层型钢梁)、内力方向发生变化的构件(吊柱)及主要受力构件(钢管混凝土拱)上,传感器方向沿构件主要受力方向。应变测点布置方案如表1所示。

表1 结构测点布置方案

Table 1 Layout scheme of measuring points

结构特征提取	测点
1层型钢梁弯曲变形	L1, L2, L3, L4, L5, L6, L11
2层型钢梁弯曲变形	L19, L20, L21
临时斜撑轴向变形	L7, L8, L9, L10
吊柱轴向变形	L12, L13, L14, L15
钢管混凝土拱轴向变形	L16, L17, L18

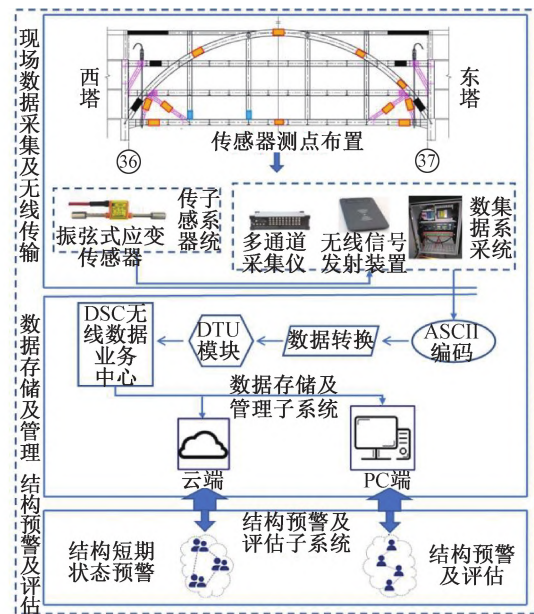


图3 健康监测系统

Fig.3 Health monitoring system

各层传感器布置位置如图4所示,传感器通过JMZ-4SX水工电缆线汇集至数据采集系统完成数模转换,再通过无线收发模块将应变数据上传云平台完成数据存储及管理,通过设置阈值对结构异常状态预警。监测过程中,信号采样频率设置为3min/次,通过蓄电池+太阳能电池板提供应变采集用电,每层采集器相互串联通过信号线与位于监测总站上的控制器相连从而实现供电和无线传输数据。

#### 3.3 吊装进程

所监测的钢连廊于2022年7月8日10:00左右开始吊装工作,至2022年11月19日完成混凝土楼板浇筑,施工进度如表2所示。

表2 施工进度

Table 2 Construction process

施工日期/(年-月-日)	施工步骤	提升高度/m
2022-07-08	钢连廊预提升	0.5
2022-07-12—07-14	钢连廊正式提升	130
2022-07-15—07-28	钢连廊与塔楼焊接	0
2022-07-28—08-02	拆除临时支撑	0
2022-09-01—09-06	释放液压索力	0
2022-11-05—11-19	浇筑楼板混凝土	0

#### 3.4 监测结果

以钢连廊起吊初始时刻为应变零点,整个施工过程监测所得结构应变响应如图5所示,部分传感器在使用过程中发生损坏,但仍监测到部分关键施工阶段产生的应变。在提升过程中,结构测点处的应变在结构吊装时的几个关键步骤中,由于边界条件及外覆荷载的改变,变化幅值为 $-250\sim 300\ \mu\epsilon$ ,在

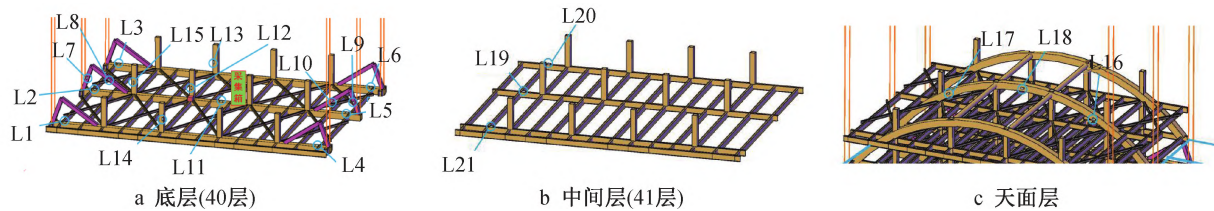


图4 钢连廊传感器布置

Fig.4 Sensor arrangement of steel corridor

结构安装过程中,受施工扰动及环境温度影响,应变数据产生了 $20\sim 100\mu\epsilon$ 的波动,在提升过程中波动较小,表明吊装过程整体平稳。

连廊预提升阶段,结构由简支静置状态变为提升状态,边界条件发生转变,导致结构传力路径发生变化,各测点处应变数据变化显著,此时索缆产生的索力通过临时支撑传递至钢管混凝土拱,主要受力构件钢管混凝土拱受到较大压应变,如图5a所示;各层间荷载通过吊柱传递至拱,吊柱受力由受压转为受拉,产生了较大拉应变,如图5b所示;在整体结构提升至指定位置后,即开展钢管混凝土拱、

主桁架与塔楼预留牛腿的焊接工作,焊接时间为07-15—07-28。由图5可知,焊接过程中,钢连廊整体并未受到较大影响,应变波动较小;在连廊与塔楼焊接完成后,即拆除临时支撑,此时结构传力路径发生变化,索缆产生的索力在临时支撑拆除后通过下弦杆传递,致使下弦杆产生了较大应变,此应变在索力释放后减小,如图5c所示,下弦杆重新处于低应力状态;混凝土浇筑阶段,结构受力体系不再转变,由于层间荷载增大,吊柱及钢管混凝土拱应变逐步稳定增大,应变变化稳定。

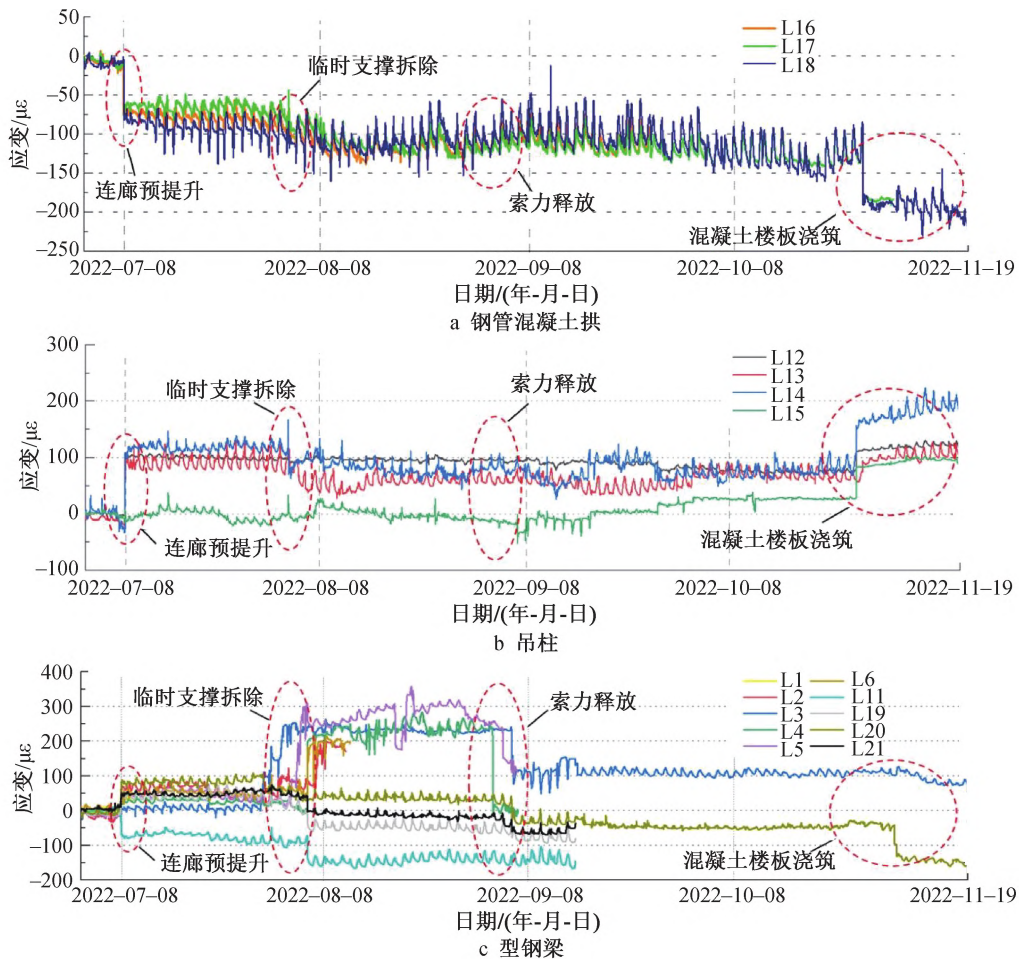


图5 实时应变监测结果

Fig.5 Monitoring results of the real-time strain

#### 4 吊装过程有限元模拟

采用 SAP2000 有限元分析软件建立钢连廊有限元模型,如图 6 所示。采用欧拉梁单元(Euler beam element)模拟型钢梁和型钢柱,用 4 结点薄壳单元(thin shell element)模拟楼板,每个结点 6 个自由度,分别对桁架结构和楼板进行建模,共 937 个梁单元,634 个结点,5 031 个自由度,模型边界条件及上覆荷载均按实际情况设置。有限元分析主要考虑结构自重及布置在结构上的恒荷载,计算模型在不同工况下,由于边界条件变化、部分临时构件拆除及浇筑混凝土楼板导致结构内力变化。计算工况如图 7 所示。

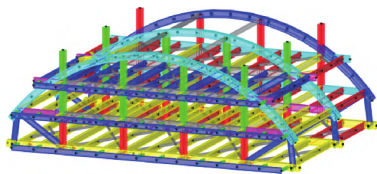


图 6 钢连廊有限元模型

Fig.6 Finite element model of steel corridor

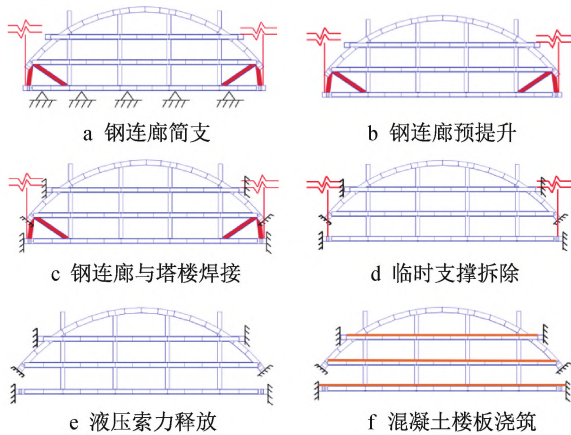


图 7 有限元模拟工况

Fig.7 Finite element simulation conditions

通过各工况有限元模型获取安装在结构上各传感器布设位置内力。应变则通过式(1),(2)获得。

$$\sigma = \frac{M}{W_z} + \frac{N}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

式中: $M$  为 SAP2000 模型得到的弯矩值; $N$  为得到的轴力值; $W_z$  为截面抵抗矩系数; $A$  为截面面积; $E$  为弹性模量; $\sigma$  为传感器位置应力; $\varepsilon$  为传感器位置应变。

#### 4.1 钢连廊简支状态有限元分析

钢连廊简支静置于拼装平台上,边界条件通过

现场实际观测确定,结构自重通过吊柱与临时支撑传递至支撑处,此阶段主要受力构件钢管混凝土拱并未受到较大内力(见图 8)。

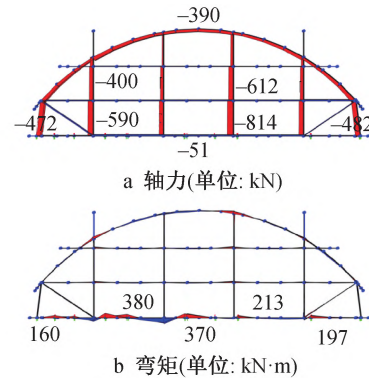


图 8 简支状态钢连廊内力

Fig.8 Internal force of the steel corridor in the simply supported state

#### 4.2 连廊预提升阶段有限元分析

钢连廊预提升阶段,边界条件发生改变,结构由静置简支状态变为由连廊两侧 6 组索缆提供拉力的吊起状态,内力变化最大构件为钢管混凝土拱(见图 9),其轴力增大 1 913kN,各层吊柱轴力方向均发生改变,拱在此阶段作为主要受力构件承受较大轴力,此阶段最大应力变化出现在临时支撑处,为-58MPa。

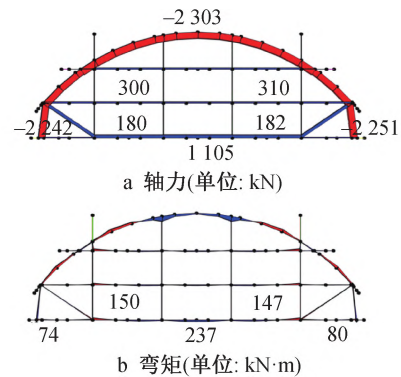


图 9 预提升状态钢连廊内力

Fig.9 Internal force of the steel corridor in the pre-lifting state

#### 4.3 焊接及临时支撑拆除阶段有限元分析

提升至预定高度后,钢管混凝土拱与塔楼连接并拆除临时支撑,结构主要传力路径(索缆→临时支撑→钢管混凝土拱)发生变化,由于临时支撑的拆除,钢混凝土拱内力直接传递至主体结构牛腿上,索缆提供的拉力通过下弦杆进行传递,致使下弦杆处产生了 -903kN·m 弯矩(见图 10),钢管混凝土拱及吊柱内力变化均略微增大,此阶段最大应力变化出现在下弦杆处,为 29MPa。

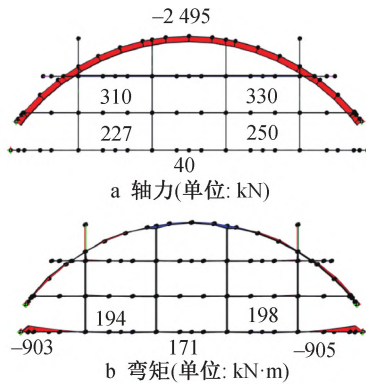


图 10 临时支撑拆除后钢连廊内力  
Fig.10 Internal force of the steel corridor after the temporary supports removed

#### 4.4 索力释放阶段有限元分析

索力释放阶段下弦杆弯矩消失,下弦杆由高应力状态进入低应力状态,由于钢连廊与塔楼已焊接,结构受力体系不再改变,钢连廊其他构件处受到的影响较小,此阶段最大应力变化出现在下弦杆下吊点处(见图 11),为 $-28\text{MPa}$ 。

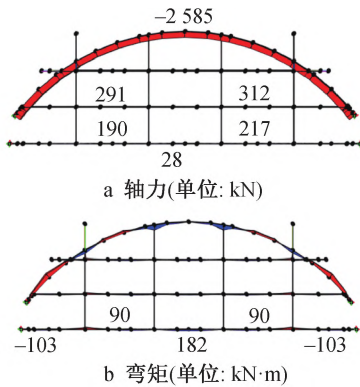


图 11 索力释放后钢连廊内力  
Fig.11 Internal force of the steel corridor after the cable force released

#### 4.5 混凝土浇筑阶段有限元分析

混凝土浇筑阶段,结构层间荷载不断增大,各层间吊柱受到的拉力增大,内力变化最大的构件为钢管混凝土拱,其轴力增大 $3\,715\text{kN}$ (见图 12)。这表明钢连廊结构设计合理,钢管混凝土拱作为主要受力构件承受较大内力,此阶段最大应力变化出现在钢管混凝土拱上,为 $-24\text{MPa}$ 。

#### 4.6 实测应变与有限元模拟应变对比分析

利用建立的有限元模型计算出各施工阶段理论应变值,与测点处实测应变响应进行对比。测试值取每个关键施工阶段前后应变数据平均值,以 1 层型钢梁 L3、2 层型钢梁 L20、1 层吊柱 L12、钢管混凝土拱 L18 为例进行说明,吊装完成后各施工阶段

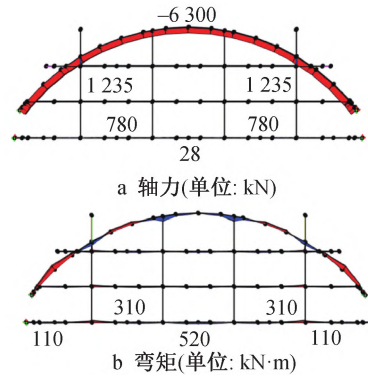


图 12 混凝土楼板浇筑后钢连廊内力  
Fig.12 Internal force of the steel corridor after the concrete floor poured

实测应变与理论应变对比如表 3 所示。

表 3 吊装完成后实测与有限元模拟应变对比

Table 3 Comparison of measured and finite element simulation strains after hoisting is completed

测点编号	应变类别	工况			
		连廊预提升	焊接及斜撑拆除	索力释放	混凝土楼板浇筑
L3	理论应变	28	152	-146	-8
	实测应变	18	188	-144	-14
	理论/实测	1.55	0.80	1.01	0.57
L12	理论应变	87	5	-4	45
	实测应变	93	8	-2	52
	理论/实测	0.93	0.63	2	0.86
L18	理论应变	-48	-6	-3	-93
	实测应变	-70	-10	-5	-120
	理论/实测	0.68	0.6	0.6	0.77
L20	理论应变	45	-47	-6	-25
	实测应变	55	-44	-8	-35
	理论/实测	0.81	1.06	0.78	0.71

注:“+”表示受拉,“-”表示受压

对比理论计算值与实测值可以看出,对于桁架杆系结构,有限元理论计算值能较准确地反映实际结构应力水平。由于钢连廊吊装施工过程中的不可控性及有限元模型不精确,造成理论应变与实测应变有差别,但随着结构受力增大,结构实测值与理论值越来越接近,利用现场实时监测与有限元模型模拟分析能有效指导施工及识别结构异常状态。L18 测点处实测值在任一施工阶段皆略大于理论值,该处理论值计算采用平截面假定,考虑到 L18 测点处为钢管混凝土,分析可能原因为钢管混凝土黏结滑移,导致理论计算所取截面刚度比结构实际截面刚度大,从而导致理论计算值偏小。

## 5 结语

本文基于广东佛山保利珑门超高层连体结构吊装,对其大跨钢连廊吊装及安装环节进行全过程实时监测,从而为整体结构施工过程的顺利进行提

供保障。通过分析监测所得结构特征应变响应,得到以下结论。

1) 对该工程中钢连廊吊装及安装进行全过程实时监测,结果表明所测得关键构件处应变响应均未达到相应材料屈服强度,表明施工过程中结构材料处于弹性工作状态。同时,应变数据在提升过程中波动较小,表明吊装过程整体平稳。

2) 吊装过程中,钢连廊应变变化主要发生在预提升阶段及混凝土楼板浇筑阶段;钢连廊从静置时的简支状态至提升状态,因其边界条件的变化造成的结构内力重分布,使拱顶轴力增大 1 913kN;在混凝土楼板浇筑阶段,外覆荷载的变化使拱顶轴力增大 3 715kN。以上 2 个阶段结构内力变化显著,证明进行结构健康监测的必要性。

3) 对于桁架杆系结构,有限元理论计算值能较为准确地反映实际结构应力水平,利用理论值与实测值对比分析,准确识别各阶段结构内力,实时分析整个过程安全程度,以确保钢连廊吊装安全。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 中国建筑科学研究院. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [ S ].北京:中国建筑工业出版社,2011.  
China Academy of Building Research. Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010 [ S ]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [ 2 ] 李宏男,李东升.土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[ J ].地震工程与工程振动,2002(3):82-90.  
LI H N, LI D S. Safety assessment, health monitoring and damage diagnosis for structures in civil engineering [ J ]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2002 ( 3 ): 82-90.
- [ 3 ] NI Y Q, XIA Y, LIAO W Y, et al. Technology innovation in developing the structural health monitoring system for Guangzhou New TV Tower [ J ]. Structural control and health monitoring, 2009, 16(1): 73-98.
- [ 4 ] XIA Y, NI Y, ZHANG P, et al. Stress development of a supertall structure during construction: field monitoring and numerical analysis [ J ]. Computer-aided civil and infrastructure engineering, 2011, 26(7): 542-559.
- [ 5 ] KIJIEWSKI-CORREA T, KWON D K, KAREEM A, et al. SmartSync: an integrated real-time structural health monitoring and structural identification system for tall buildings [ J ]. Journal of structural engineering, 2013, 139(10): 1675-1687.
- [ 6 ] ROUSSEL M, GLISIC B, LAU J M, et al. Long-term monitoring of high-rise buildings connected by link bridges [ J ]. Journal of civil structural health monitoring, 2014, 4(1): 57-67.
- [ 7 ] GAO F, ZHOU H, LIANG H, et al. Structural deformation monitoring and numerical simulation of a supertall building during construction stage [ J ]. Engineering structures, 2020, 209: 110033.
- [ 8 ] 完海鹰,钟文龙,陈克军,等.大跨度高空连体钢结构整体提升施工控制技术[ J ].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(8):971-975.  
WANG H Y, ZHONG W L, CHEN K J, et al. Technology of construction and control of integral lifting in high-altitude and large-span conjoined steel structure [ J ]. Journal of Hefei University of Technology ( natural science ), 2014, 37 ( 8 ): 971-975.
- [ 9 ] 刘沛,丁洁民,吴宏磊.河南建设大厦大跨度连体结构分析与设计 [ C ] //第十八届高层建筑抗震技术交流会论文集,2021.  
LIU P, DING J M, WU H L. Analysis and design of large-span connected structure of Henan Construction Building [ C ] // Proceedings of the 18th High-rise Building Seismic Technology Exchange Conference, 2021.
- [ 10 ] 倪国荣,何文明,刘义平.上海某大跨连体结构支座反力监测和理论分析结果对比 [ C ] //第七届全国建筑结构技术交流会论文集,2019.  
NI G R, HE W M, LIU Y P. Comparison of bearing reaction monitoring and theoretical analysis results of a large-span conjoined structure in Shanghai [ C ] // Proceedings of the 7th National Building Structure Technology Exchange Conference, 2019.
- [ 11 ] 叶琳远.超高层建筑结构健康监测系统技术应用 [ D ].广州:华南理工大学,2018.  
YE L Y. Technical application of structural health monitoring system for super-high buildings [ D ]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [ 12 ] 张旭辉,吴海粟,马捷,等.某钢结构连廊吊装施工过程的应力监测分析 [ J ].空间结构,2020,26(1):82-89,58.  
ZHANG X H, WU H L, MA J, et al. Stress monitoring and analysis during construction of steel structure gallery [ J ]. Spatial structures, 2020, 26(1): 82-89, 58.
- [ 13 ] 陈小利,刘成伟,郭永昌,等.一种超高层上连体结构整体提升施工控制方法 [ J ].中国科技信息,2022(24):98-102.  
CHEN X L, LIU C W, GUO Y C, et al. A construction control method for integral lifting of super high-rise connected structure [ J ]. China science and technology information, 2022 ( 24 ): 98-102.