

某高层建筑悬垂屋盖钢结构施工过程分析

方 励,徐韶锋,易建文,刘重阳,万 勇

(杭萧钢构股份有限公司,浙江 杭州 310003)

[摘要] 杭州世纪中心屋盖为大跨度悬垂式钢结构网壳,面积超大、造型独特,为极具创新的结构形式,采用地面网格单元拼装、高空分块安装施工方案。通过全过程施工分析,对结构构件受力和变形进行控制,并对卸载方案进行对比分析。钢拱连桥作为上部临时支撑结构基础平台,在整个施工过程中其变形和承载力均能满足规范要求,同时对临时支撑结构体系进行设计。通过施工过程监测可知,卸载完成后监测点最大 z 向变形约为16mm,关键杆件最大应力约为79MPa,监测结果与施工分析结果接近。

[关键词] 钢结构;屋盖;拼装;卸载;支撑;有限元分析

[中图分类号] TU758

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)20-0036-06

Construction Process Analysis of Overhanging Roof Steel Structure for a Tall building

FANG Li, XU Shaofeng, YI Jianwen, LIU Chongyang, WAN Yong

(Hangxiao Steel Structure Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310003, China)

Abstract: The roof of Hangzhou Century Center is a large-span overhanging steel reticulated shell with super-large area and unique shape. It is a very innovative structural form. The construction scheme of ground grid unit assembly and high-altitude block installation is adopted. Through the whole process construction analysis, the stress and deformation of the structural components are controlled, and the unloading schemes are compared and analyzed. As the foundation platform of the upper temporary support structure, the deformation and bearing capacity of the steel arch bridge can meet the requirements of the code during the whole construction process, and the temporary support structure system is designed. Through the construction process monitoring, the maximum z -direction deformation of the monitoring points after unloading is about 16mm, and the maximum stress of the key components is about 79MPa. The monitoring results are close to the construction analysis results.

Keywords: steel structures; roofs; assembling; unloading; supports; finite element analysis

1 工程概况

杭州世纪中心项目位于浙江省杭州市钱塘江南岸,由2栋高约310m超高层塔楼和配套商业裙楼组成。2栋塔楼采用钢筋混凝土框架-核心筒结构体系,中间双塔底部由1座钢拱连桥连接,其上悬垂屋盖横跨于2栋塔楼间,在中间与下部钢拱连桥顶部形成大跨度公共空间,如图1所示。

悬垂屋盖通过外露杆件直接呈现建筑轮廓,形式新颖。其复杂节点需高精度制作,在高空散装工艺下,多重因素显著影响结构受力与变形控制。



图1 建筑效果

Fig.1 Effect of the architecture

基于工程特点,在钢拱连桥与悬垂屋盖间设计1个临时支撑结构用于安装网格单元是本工程关键之一,钢拱连桥作为上部临时支撑结构的基础平台,需复核其在整个施工过程中的承载力及稳定性。

施工过程中钢结构单元安装顺序及卸载方案对结构稳定性和卸载后结构位移、构件内力等有较大影响。因此,根据拟定施工方案对施工全过程进行跟踪分析,对构件受力和变形进行精确控制,可为施工方案提供依据。

2 钢结构概况

2.1 钢拱连桥

钢拱连桥位于 2 栋塔楼间,在相连接的楼层通过伸缩缝与塔楼完全脱开。其主跨度约 62m,高约 34m,宽约 58m,采用拱桁架结构,由 6 榀大跨钢拱和斜腹杆组合而成。3 层设有宴会厅,6 层顶板设有 17 榀 29m 跨桁架,为下方宴会厅营造大跨度空间,如图 2 所示。施工过程中 6 层楼面作为安装屋盖网格单元的临时支撑结构平台。

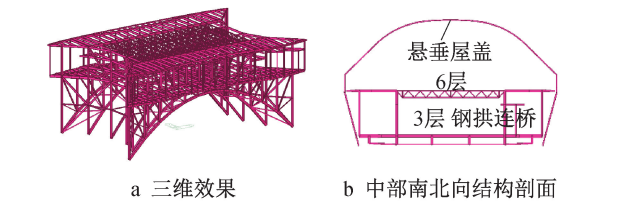


图 2 钢拱连桥三维效果及剖面

Fig. 2 3D effect and section of steel arch bridge

2.2 悬垂屋盖

悬垂屋盖由悬垂网格单元、边界单元、侧墙及侧向支撑系统构成。整个屋盖自塔楼 22 层(标高 103.450m)的悬挑钢桁架端部悬挂而下,最大跨度达约 78m,垂幅达 50~80m。其中,悬垂网格单元为单层双向弯曲网壳,东西向共有 47 道纵向单元线,南北向共有 39 道横向单元线。除顶部封边梁及南、北两侧边界单元外,网格单元均采用 H 型钢,纵、横向杆件通过 1 665 个钢鼓节点焊接连接。侧墙为一系列竖向长方形箱形构件,从顶部自边界单元悬挂而下。钢网格屋面和侧墙的侧向约束,由设置在东西塔楼 11、14、18 层的水平拉杆支撑系统和侧墙约束梁支撑系统,以及与钢拱连桥 3、6 层楼面钢梁的水平连接共同提供,如图 3 所示。

悬垂屋盖纵、横向一般杆件截面尺寸为 HN300×150×6.5×9,加强杆件截面尺寸为 H300×150×10×25;22 层封边梁截面尺寸为 □600×350×40;侧墙杆件截面尺寸为 □300×100×10×25, □300×100×8×15;南、北边界单元截面尺寸为 □400×25。钢材材质均为 Q345B。

3 悬垂屋盖钢结构施工总体思路

3.1 安装方案

根据施工组织计划,在 2 栋塔楼施工至 20 层以

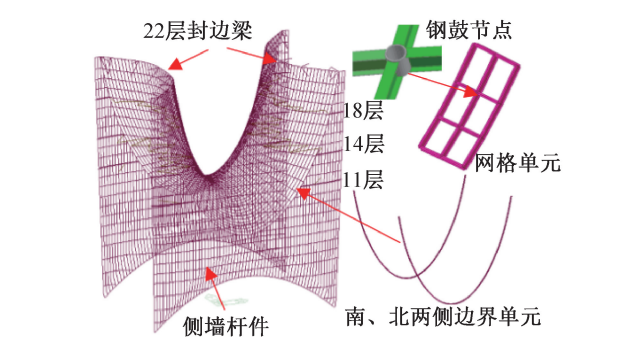


图 3 悬垂屋盖钢结构示意

Fig. 3 Steel structure of overhanging roof

上、钢拱连桥部分(顶标高 34.100m)施工完成且临时支撑结构安装完成后,悬垂屋盖开始施工。结合工程结构特点及现场施工条件,采用地面网格单元拼装、高空分块安装的施工方案。单个网格单元包含 9~12 个钢鼓节点。

悬垂屋盖网格结构现场施工时,先安装 21 层东、西两端悬挑钢桁架及封边梁,然后按以下顺序对网格单元进行安装:自下往上从 7 层悬垂屋盖中部向上对称安装至 14 层→自上往下从两侧塔楼 22 层向下对称倒挂安装至 15 层→将 14~15 层间的连接梁作为合龙段进行安装,然后按施工分段自上往下安装南、北两侧边界单元,并在最低位置合龙。悬垂网格单元安装完成后,分别安装 18、14 层的水平拉杆支撑系统,自上往下分块安装南、北两侧侧墙杆件,并安装 18、14、11 层侧墙面外约束梁系统。现场施工时,东、西两侧悬垂屋盖为同时对称安装。

3.2 卸载方案

悬垂屋盖为半刚性大跨度空间网壳,通过临时支撑结构辅助安装。为控制安装精度并满足分块单元安装后的临时固定要求,在临时支撑结构与悬垂网格间,按隔一设一的方式在相邻网格鼓节点处设置支撑短杆,支撑点近 1 000 个,以此确保安装精度。根据悬垂屋盖悬链式受力特点,为保证卸载过程中结构整体稳定性,通过多方案对比分析,按悬垂屋盖南北方向 39 道横向单元线的布置,将整个悬垂屋盖对称划分为 19 个卸载区,采取自上而下对称卸载方案。

3.3 施工分析必要性

由于悬垂屋盖形式特殊,高空安装、施工难度大,对于施工过程中比较关键的问题,无可借鉴的施工经验。因此,通过施工全过程模拟计算,从以下多方面给出动态量化指标,是保证工程安全有效实施的重要环节。

1)通过施工全过程模拟分析,获取结构构件全

过程应力水平及变形数据。

2)按施工方案模拟施工加载,保留卸载前钢结构构件内应力,作为卸载初始工况应力。

3)通过计算分析,提取各支撑点施工过程中反力数据,用于临时支撑结构设计。

4)制定可行的卸载方案,追踪卸载过程中结构变形、杆件内力变化,分析卸载过程的合理性并评估安全性。

5)校核施工过程中钢拱连桥变形、承载力及稳定性,对不满足设计要求的部位进行加强。

6)根据计算结果,并结合现场实测数据确定结构在各施工阶段和各种环境下的变形规律,作为钢结构验收的变形指标依据。

4 全过程施工分析

运用有限元计算程序中将“死”单元逐次激活的技术,对钢结构整个施工过程进行分析,模拟结构在整个施工过程中刚度、荷载和边界条件变化情况。采用 MIDAS Gen 软件建立钢拱连桥、临时支撑结构及悬垂屋盖结构整体分析模型,如图 4 所示,在不同施工步中依次施加相应阶段荷载、边界条件及结构构件,模拟整个施工过程中结构内力与变形的发展过程。

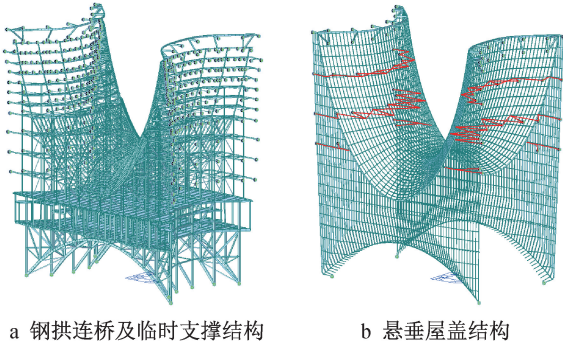


图 4 计算模型
Fig. 4 Calculation models

4.1 分析模型及边界处理

按施工方案,施工过程分析中共包含 15 个加载工况,依次命名为 CS1~CS15,并将整体模型对应划分为 15 个结构组,如图 5 所示,各结构组关于中心线对称。考虑到每个悬垂网格单元安装过程中均通过支撑短杆进行定位找平,且钢拱连桥和临时支撑结构作为整个悬垂屋盖安装的支撑平台,可将其作为第 1 个结构组。主要施工顺序如下。

1)第 1 步(CS1)。施工钢拱连桥、临时支撑结构、21 层悬挑钢桁架及封边梁。

2)第 2~5 步(CS2~CS5)。依次施工第 2,3,4,5 组悬垂网格单元,各相邻单元间通过横向、竖向 H

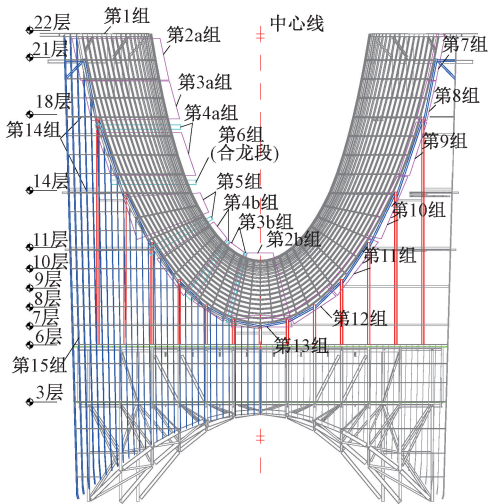


图 5 悬垂屋盖网格分组
Fig. 5 Grouping of suspended roof grid

型钢梁嵌补的方式连接。

3)第 6 步(CS6)。施工第 6 组作为合龙段的嵌补钢梁。

4)第 7~13 步(CS7~CS13)。自上往下依次施工第 7~13 组南、北边界单元。

5)第 14 步(CS14)。施工第 14 组位于 14, 18 层的水平拉杆支撑系统。

6)第 15 步(CS15)。施工第 15 组南、北两侧侧墙杆件,并安装 11, 14, 18 层侧墙的面外约束梁支撑系统。

在安装、卸载过程中,临时支撑结构与悬垂网格单元间的部分支撑短杆会出现提前脱开的情况,采用仅受压特性的弹性连接单元可真实模拟支撑点与悬垂网格单元的支承关系。临时支撑短杆规格为 $\phi 159 \times 6$, 长度为 600mm 左右,如图 6 所示。

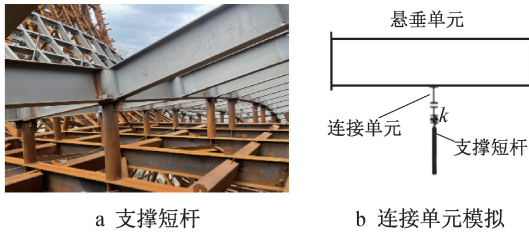


图 6 支撑单元模拟
Fig. 6 Simulation of supporting unit

侧墙杆件通过销轴与钢拱连桥楼面钢梁及 11, 14, 18 层面外约束梁连接。该连接沿杆长竖向可自由滑动,在软件中可由两端转动释放的短梁或仅有轴向刚度的连接单元模拟实现。

4.2 安装工况施工分析结果

仅截取关键工况的位移和应力云图(见图 7),云图中不包含下部钢拱连桥及临时支撑结构。施

工过程中作用于悬垂网格单元上部的施工荷载按其自重的 20%考虑。

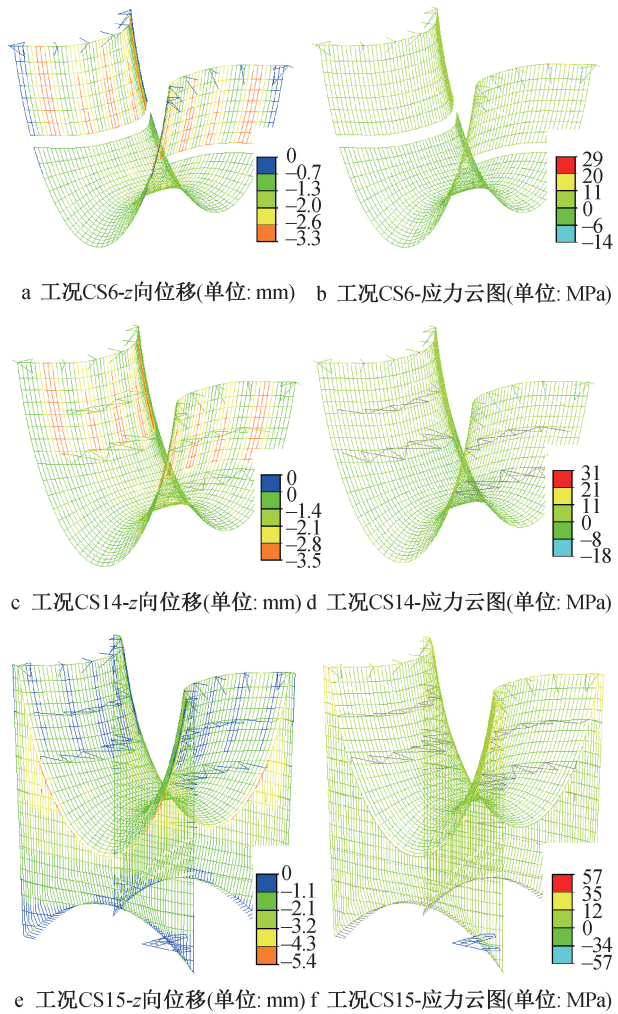


图 7 关键安装工况位移、应力云图

Fig. 7 Displacement and stress of key installation conditions

由图 7 可知,悬垂网格单元按分块对称原则施工,且采用钢鼓节点间隔支承的多点支承形式,整个安装过程中体系变化稳定。区别于 14 层以下网格单元,15 层以上的网格单元采用从两侧塔楼 22 层开始向下逐层对称倒挂安装的方案,支撑短杆仅提供安装固定作用,自重由网格单元自身承担,结构内力及位移均相对较小。第 15 步为侧墙杆件施工步,自南、北两侧边界单元向下悬挂施工,相当于对前序结构体追加荷载,该施工步下杆件最大应力为 57MPa,位于边界单元附近。由于临时支撑结构的支承作用,整个安装过程中结构变形可控。

4.3 卸载工况施工分析结果

卸载过程是荷载由临时支撑结构承担逐渐动态转为由永久结构承担的过程。卸载工况下的结构体系和应力状态不同于结构设计时工况,卸载方式及卸

载顺序是卸载方案中需充分论证的关键要素。

通过对比分析,遵循分步、分节、等量、均衡、缓慢的卸载原则,保证卸载过程中结构受力与变形协调、变化过程平缓且便于现场操作,因而采用对称分区块、自上往下的卸载方案。整个施工过程模拟分析包含 7 个卸载工况,依次命名为 CS16~CS22,自上往下依次卸载 2a,3a,4a,5,4b,3b,2b 组各区块网格间鼓节点下部支撑短杆。卸载结束后,对 14、18 层的水平拉杆支撑系统的钢拉杆施加预应力,施工工况为 CS23。本文仅截取卸载完成后的位移和应力云图(见图 8)。

在逐步卸载过程中,结构不断趋近于自由受力状态,由图 8 可知,卸载完成后悬垂网格最大 x 向位移为 11.3mm,最大 y 向位移为 10.3mm,最大 z 向位移为 15.3mm,主要发生在靠近南、北两侧边界单元附近。最大应力位于顶部与悬挑桁架连接的边界单元处,为 89MPa,杆件均处于弹性范围,卸载完成后内力及变形状态符合结构传力特点,整个卸载过程安全可控。

结合悬垂屋盖悬链式结构特点,按自上往下及自下往上 2 种卸载顺序进行施工模拟分析对比,验证卸载方案的合理性,并给出关键点(杆件)位移(内力)对比曲线(见图 9,10)。

卸载完成后,悬垂屋盖 z 向位移最大值点 y, z 向位移对比曲线如图 9 所示,其位置于图 8c 中示意。在自上往下卸载过程中,拆除 14 层以上支撑短杆时,悬垂屋盖未见明显变形,其下部悬垂网格单元仍被支承;待该点附近及以下支撑点分步卸载后,位移逐渐增大。由数据可知,在从悬垂网格单元最低处依次向上卸载至 14 层的过程中,位移显著增大,悬垂网格单元变形对 14 层以下支撑点的卸载较为敏感。

由图 10b 可知,按自两侧塔楼 22 层向下对称倒挂的安装方案,在 CS7~CS14 边界单元安装过程中,其轴力增量主要源于结构自重的逐步施加。CS15 为侧墙安装工况,其轴力增幅明显,此工况下侧墙自重由边界单元构成的悬链线及其下部临时支撑结构共同承担。CS16~CS22 为悬垂屋盖卸载工况步,由对比曲线可知,自上往下卸载过程中其轴力的增幅更缓和均匀。由图 10a 可知,内力幅值远小于边界单元,由于靠近边界单元,其变化趋势基本相同。最终按自上往下的方案进行卸载,整个卸载过程平稳、协调、缓和,顺利完成了结构体系转换。

5 结构健康监测

监测分 2 个阶段:施工阶段对悬垂网格单元安

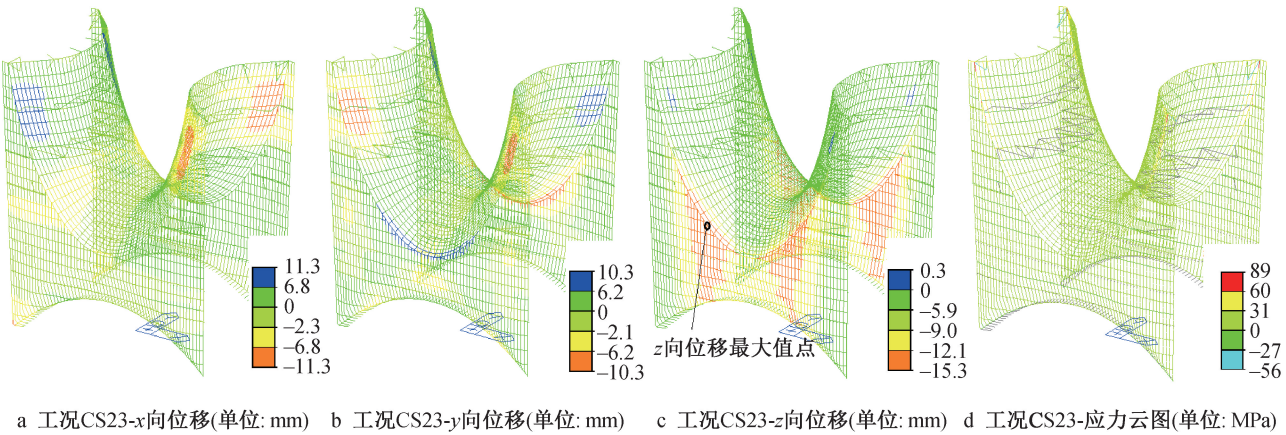


图 8 卸载完成后位移、应力云图

Fig. 8 Displacement and stress after unloading is completed

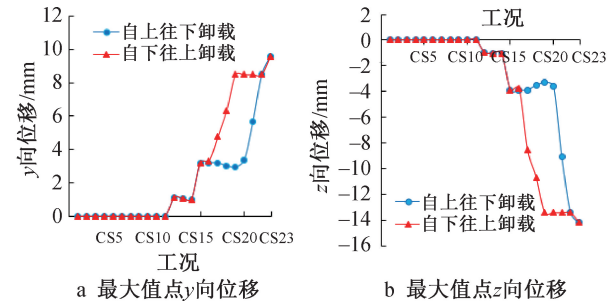


图 9 位移对比曲线

Fig. 9 Comparison curves of displacement

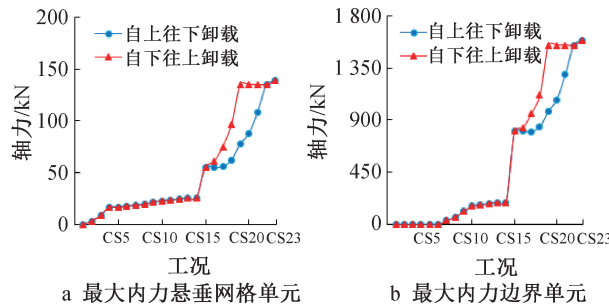


图 10 杆件内力对比曲线

Fig. 10 Comparison curves of component internal force

装过程中的应力-应变、关键节点定位及变形进行监测;运营阶段对悬垂网格单元应力-应变及动力特性进行监测,监测周期为 3 年。通过在结构上布设传感器,连续监测、记录结构关键部位应变、位移、温度、振动特性等关键指标,根据监测数据分析结构安全性,及时预警危及结构安全的状态。

22 层支撑桁架为关键受力构件,南、北侧幕墙荷载经边界单元传递至该桁架,故边界单元亦为重要受力构件。悬垂网格单元东西向共 47 道单元线,按均匀分布且兼顾监测有效性的原则,每隔 4 条线选取 1 条线布置测点,并在上述关键构件上均匀布

设应变计,共布置 164 个测点。

在布有应变计的 10 条网格单元线上,每隔 1 个节点布设 1 个变形测点,共 25 个变形测点,用于监测悬垂网格单元在安装过程中空间位置及后期幕墙施工期间的变形。变形测点布置如图 11 所示。

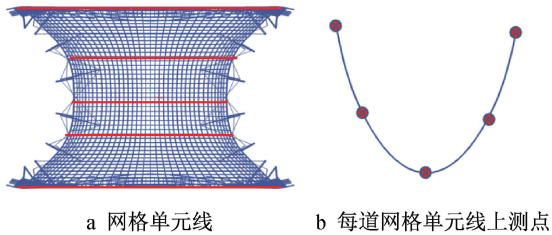


图 11 变形测点布置

Fig. 11 Layout of deformation measuring points

卸载完成后,监测点变形最大值位于南北边界单元中下部,最大 z 向变形约为 16mm,关键杆件最大应力约为 79MPa,发生在南、北两侧边界单元顶部,监测结果与施工分析接近,结构响应处于正常范围。

6 临时支撑措施分析

悬垂屋盖位于钢拱连桥上方 6~22 层立面区域;在东、西塔楼间横向约 30m 的范围内,各临时支撑点间高差达 60m。由于施工环境及屋面空间位置等限制,普通满堂脚手架措施无法满足施工要求,采用钢框架支撑结构,即在钢拱连桥 6 层楼面上,沿下部拱上立柱位置向上设置钢柱,并每隔 1~2 层设置柱间水平连系杆或钢梁,形成框架结构。同时,南北向通过设置柱间支撑形成无侧移体系,东西向通过系杆或钢梁与东、西塔楼连接,保证该向结构抗侧刚度。支撑结构顶部根据马鞍形空间线形在网格单元底部约 600mm 距离进行整体找形,设置相应支撑点。

6.1 钢拱连桥承载力分析及临时支撑框架设计

钢拱连桥作为临时支撑框架结构的基础,不仅

需对临时支撑框架结构进行分析设计,还需验算整个施工过程中钢拱连桥结构强度和变形情况,以确保其处于稳定、安全状态,满足正常施工要求。

钢拱连桥中部南北向结构剖面如图 12 所示。为加强楼面支承刚度,使上部临时支撑框架柱反力直接传递至钢拱连桥拱桁架,在 3~6 层间沿钢拱桁架腹杆向上设置支撑立柱。计算过程中,建立钢拱连桥与上部临时支撑框架整体模型,如图 4a 所示,并按钢拱连桥施工方案,进行施工模拟分析。关键施工步骤为:6 榀钢拱安装→拱上桁架及 3 层楼面钢结构安装→6 层楼面钢结构安装→3,6 层混凝土楼面浇筑→上部临时支撑框架结构安装→悬垂屋盖安装,并进行结构设计。钢拱连桥承载力分析与临时支撑框架设计中考虑的荷载主要有悬垂屋盖结构安装荷载、钢拱连桥各楼面施工活荷载、风荷载等。分别截取钢拱连桥及临时支撑框架设计应力比云图,如图 13 所示。

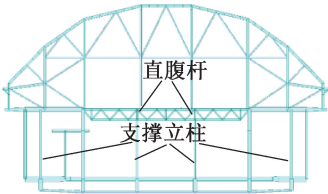


图 12 钢拱连桥中部南北向结构剖面

Fig. 12 The north-south structural section in the middle of steel arch bridge

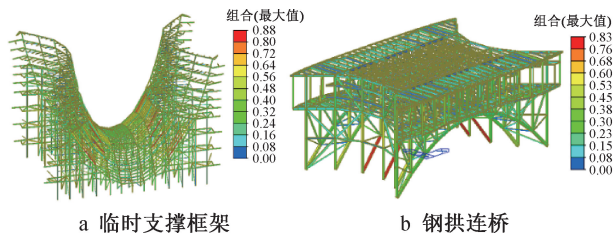


图 13 结构设计应力比

Fig. 13 Design stress ratio of structure

由图 13 可知,在悬垂屋盖施工过程中,临时支撑框架杆件最大应力比为 0.88,钢拱连桥杆件最大应力比为 0.83,主要位于中间 2 榀钢拱下部,整个结构变形、承载力及稳定性满足结构安全要求。

6.2 钢拱连桥加固措施与临时支撑框架连接设计

钢拱连桥承受了临时支撑框架和悬垂屋盖自重及所有施工荷载,施工时在以下部位采取加固措施:宴会厅桁架跨度三等分点处增设永久直腹杆;3~6 层间增加临时支撑立柱;在中间 2 榀钢拱平面外增设系杆,增强其稳定承载力。

支撑框架结构作为临时措施,其连接节点可根

据计算内力进行设计。为提升构件制作及安装效率,在满足承载力要求下,对部分节点进行设计优化。例如,圆管垂直支撑与钢柱连接时,通过在钢柱壁外侧设置补强钢板与圆管相贯对接连接;系杆与塔楼混凝土柱通过可拆卸的钢抱箍连接,方便现场施工及后期拆除工作,如图 14 所示。



a 圆管垂直支撑-钢柱连接节点 b 系杆-钢抱箍连接节点

图 14 现场连接节点

Fig. 14 Connection joints on site

悬垂屋盖卸载结束后,自上往下依次拆除临时支撑框架结构及钢拱连桥上临时加固措施。

7 结语

杭州世纪中心悬垂屋盖为大跨度悬垂马鞍形钢结构网壳,详细阐述施工总体思路、施工安装步骤和卸载方案,采用有限元软件进行全过程施工模拟分析,整个过程中结构变形、承载力及稳定性均满足结构安全要求,验证了施工方案的可行性。结合特殊施工环境,以钢拱连桥为基础支撑平台,采用钢框架-支撑形式的临时支撑结构,充分论证分析精细化的支撑措施设计,使项目按既定施工方案顺利实施。通过施工过程监测,卸载完成后监测点最大 z 向变形约为 16mm,关键杆件最大应力约为 79MPa,监测结果与施工分析结果接近,结构响应处于正常范围,各项指标均在设计及施工控制范围内,为类似工程施工提供了借鉴。

参考文献:

[1] 陈晋,托比·米切尔,马克思·库珀,等. 杭州之门项目大跨度悬垂网格钢结构设计[J]. 建筑结构,2019,49(21):34-42.
CHEN J, MITCHELL T, COOPER M, et al. Design of long-span suspended grid steel structure of Hangzhou Gate project [J]. Building structure, 2019, 49(21): 34-42.
[2] 林晓宇,杨笑天,张伟伟. 杭州世纪中心悬链网格结构分析[J]. 建筑结构,2022,52(9):81-86.
LIN X Y, YANG X T, ZHANG W Y. Analysis of catenary grid structure of Hangzhou Century Center [J]. Building structure, 2022, 52(9): 81-86.
[3] 束伟农,朱忠义,閻东东,等. 腾讯北京总部大楼施工关键问题研究[J]. 建筑结构,2019,49(18):115-119,24.
SHU W N, ZHU Z Y, GE D D, et al. Research on key problems of construction for Tencent (Beijing) Headquarters Building [J]. Building structure, 2019, 49(18): 115-119, 24.

拉片进行分类回收和妥善保管,以便下次使用。对于损坏或变形的拉片,应及时进行维修或更换。若采用一次性拉片,需注意拉片断口处理的完整性,同时需做好断口防腐防锈和局部墙面修补措施。

综上,对于超高层住宅的竖向承重结构,拉片宜选用 2mm 厚高强度合金钢拉片。本项目采用 50 号锰钢制的 2mm 厚一次性拉片,拉片抗拉强度达 28kN 以上的保证率为 98%,达 30kN 以上的保证率为 90%。铝模拉片试验数据会因材质、规格、生产工艺及试验条件等因素而异,选用时应结合具体工程要求,参考相关试验数据,选取性能稳定可靠的产品。

参考文献:

[1] 黄锋辉,许彬,胡蒙蒙,等. 铝模加固体系最优选型研究 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52 (2): 108-113.
HUANG F H, XU B, HU M M, et al. Study on the optimal type of aluminum formwork reinforcement system [J]. Construction technology,2023, 52 (2): 108-113.

[2] 李林林,陈浩,刘平,等. 对拉螺杆式与拉片式加固体系应用对比分析[J]. 城市住宅,2017,24(7):125-128.
LI L L, CHEN H, LIU P, et al. Comparative analysis on the application of pull screw and pull sheet reinforcement system[J]. City & house,2017,24(7):125-128.

[3] 马欢. 拉片式铝模板体系力学分析及设计研究[D]. 西安:西安工业大学,2023.

(上接第 41 页)

[4] 罗永峰,王春江,陈晓明,等. 建筑钢结构施工力学原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
LUO Y F, WANG C J, CHEN X M. Construction mechanics principle of building steel structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2009.

[5] 高颖,傅学怡,杨想兵. 济南奥体中心体育场钢结构支撑卸载全过程模拟[J]. 空间结构,2009,15(1):20-26,34.
GAO Y, FU X Y, YANG X B. Whole removal process simulation of temporary support of Jinan Olympic Stadium [J]. Spatial structures,2009,15(1):20-26,34.

[6] 郭彦林,刘学武. 大型复杂钢结构施工力学问题及分析方法[J]. 工业建筑,2007,37(9):1-8.
GUO Y L, LIU X W. Construction mechanical problems and computational methods of complex steel structures[J]. Industrial construction,2007,37(9):1-8.

[7] 杨建鹏,侯学勇. 大跨度双层网壳安装技术研究 [J]. 施工技术(中英文),2025,54 (5): 63-67.
YANG J P, HOU X Y. Research on installation technology of

MA H. Mechanical analysis of pull-sheet aluminum formwork systems and design study [D]. Xi ' an: Xi ' an Technological University,2023.

[4] 杨东,张慧杰,陈雅,等. 超高楼层铝合金模板满堂架支撑体系施工技术 [J]. 施工技术(中英文), 2025, 54 (2): 131-135.
YANG D, ZHANG H J, CHEN Y, et al. Construction technology of full framing support system for aluminum alloy formwork in super high-rise buildings [J]. Construction technology, 2025,54 (2): 131-135.

[5] 李林林,陈浩,李川江,等. 铝合金模板的对拉螺杆式与拉片式加固体系的应用对比分析[J]. 建筑施工,2017,39(10):1571-1573.
LI L L, CHEN H, LI C J, et al. Comparative analysis of application of opposite-pull screw type and pull tab type reinforcement system for aluminum alloy formwork [J]. Building construction,2017,39(10):1571-1573.

[6] 罗克嵩. 基于 ANSYS 铝合金模板拉片体系的力学性能分析及优化[D]. 南昌:南昌航空大学,2020.
LUO K S. Analysis and optimization of mechanical properties of aluminum alloy template pull-tab system based on ANSYS [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University,2020.

[7] 李膺宇,胡成,刘镒,等. 斜拉加固模板体系在片石混凝土桥台施工中的运用[J]. 重庆建筑,2022,21(10):69-71.
LI Y Y, HU C, LIU Y, et al. Application of cable-stayed reinforcement formwork system in construction of rubble concrete abutment [J]. Chongqing architecture,2022,21(10):69-71.

large-span double-layer reticulated shell [J]. Construction technology,2025,54 (5): 63-67.

[8] 肖从真. 高层建筑结构仿真分析技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
XIAO C Z. The simulation analysis technology of high-rise building structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2021.

[9] 邓裕民,郑宏雨,彭江衡,等. 某铁路站房异形钢屋盖整体提升方案优化及非同步提升分析 [J]. 施工技术(中英文), 2025,54(2):65-70.
DENG Y M, ZHENG H Y, PENG J H, et al. Optimization of overall lifting scheme and non-synchronous lifting analysis of special-shaped steel roof of a railway station [J]. Construction technology, 2025,54 (2): 65-70.

[10] 郁政华. 某演艺中心船体异形钢结构施工技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(8):34-38.
YU Z H. Construction technology of hull special-shaped steel structure for a performing arts center [J]. Construction technology,2024,53(8):34-38.