

DOI: 10.7672/sjgs2025020108

高空环形建筑物悬挑结构施工技术*

胡长明^{1,2}, 侯旭辉¹, 田鹏刚³, 张丽莎⁴, 王忠宇¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 延安大学西安创新学院, 陕西 西安 710100; 3. 陕西建工控股集团未来城市创新科技有限公司, 陕西 西安 712000; 4. 未来城市建设与管理创新联合研究中心, 陕西 西安 712200)

[摘要] 针对上宽下窄环形悬挑结构, 提出一种创新的施工技术及应用方案。采用下部先行、上部跟进、分步施工逻辑, 通过搭设辐射型三角托架式操作平台完成下层悬挑结构施工, 随后依托下层悬挑结构实现部分上层结构施工, 然后通过钢丝绳拉结上层结构后扩展下层施工平台, 最后完成上层剩余悬挑结构施工。结合西安某发射塔工程, 详细阐述其悬挑结构施工关键技术。采用 ABAQUS 软件进行有限元分析, 验证环形悬挑结构施工平台在钢丝绳卸荷状态下整体受力性能。结果表明, 环形悬挑支撑架体受力满足要求。

[关键词] 高层建筑; 钢结构; 悬挑结构; 施工技术; 数值模拟

[中图分类号] TU758.11

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)02-0108-05

Construction Technology of Cantilever Structures in High-altitude Circular Buildings

HU Changming^{1,2}, HOU Xuhui¹, TIAN Penggang³, ZHANG Lisha⁴, WANG Zhongyu¹

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. Xi'an Innovation College of Yan'an University, Xi'an, Shaanxi 710100, China; 3. Shaanxi Construction Engineering Holding Group Future City Innovation Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 712000, China; 4. Joint Research Center for Future Urban Construction and Management Innovation, Xi'an, Shaanxi 712200, China)

Abstract: An innovative construction technology and application scheme are proposed for the upper wide and lower narrow circular cantilever structure. Adopting the logic of lower first, upper follow-up, and step-by-step construction, the construction of the lower cantilever structure is completed by setting up a radiation-type triangular bracket-type operating platform. Subsequently, the construction of some upper structures is realized by relying on the lower cantilever structure. Then, the lower construction platform is extended after the upper structure is tied by the steel wire rope, and finally the construction of the upper remaining cantilever structure is completed. Combined with a launching tower project in Xi'an, the key technology of cantilever structure construction is described in detail. The finite element analysis is carried out by ABAQUS software to verify the overall mechanical performance of the construction platform of the circular cantilever structure under the unloading state of the wire rope. The results show that the stress of the circular cantilever support frame meets the requirements.

Keywords: tall buildings; steel structures; cantilever structures; construction; simulation

0 引言

随着现代建筑设计的多元化, 上宽下窄悬挑结构因独特的设计和功能性, 逐渐成为建筑行业的重

要趋势。这种设计不仅提供了优雅的视觉效果, 还提升了建筑物空间利用率。然而, 悬挑结构施工面临诸多挑战, 包括结构稳定性、施工工艺流程复杂性及安全风险控制等。

在施工上部结构时, 已完成的下部结构往往无法作为有效的支撑平台, 这增加了施工难度。此外, 悬挑结构在施工过程中需精确的施工监测和控

* 国家重点研发计划(2019YFC1509302); 未来城市建设与管理创新联合研究中心“揭榜挂帅”科研项目(2023WHZ0129)

[作者简介] 胡长明, 教授, 博士生导师, E-mail: hu_tm@163.com

[收稿日期] 2024-03-01

制,以确保结构安全和稳定。通常施工平台采用满堂脚手架进行搭建,但这种方法在高层建筑施工中占地面积大、搭建和拆除耗时长、需要大量钢管材料,并且安全风险较高。

以西安某发射塔工程为背景,针对上宽下窄悬挑结构,提出一种创新的施工技术及应用方案。该方案采用下部先行、上部跟进、分步施工逻辑,不仅有效减少了施工场地占用,缩短了工期,而且降低了材料消耗和安全风险。

1 工程概况

西安某发射塔工程由筒体结构、3根弧形钢管柱、下部辅楼及上部瞭望平台组成。3根弧形钢管柱围绕筒体结构呈等边三角形布置,筒体顶标高为78.400m,与弧形钢管柱在标高94.120m处交汇闭合。筒体结构在标高10.000,24.900,30.000,45.000,59.900,65.400,69.4500m处和3根弧形钢管柱利用型钢混凝土梁连接成整体。在筒体结构标高24.900,30.000m处分别有长3.05,3.45m悬挑结构形成辅楼结构,标高59.900,65.400,69.450m处分别有长5.51,7.94,4.4m外伸水平悬挑结构,形成瞭望平台,保证外侧360°无遮挡。平台最大外伸(从筒体外皮算)约8.2m,装饰面最大外伸约10.3m。

2 工程难点分析

1)标高59.900,65.400m处高空悬挑结构伸出长度长且为圆弧形梁板,模板支设难度大,施工复杂。采用落地式脚手架既浪费大量钢材,占用地面面积大,影响工期,又因高度超高导致架体稳定性差,变形难以控制,影响质量和安全。如何保证操作人员安全并确保悬挑结构施工质量是本项目难点。

2)工程筒体结构外侧弧形钢管柱钢管直径为1400mm,壁厚20mm,钢管柱距筒体外侧约4.5m,在筒体四周呈等边三角形布置。3根钢管混凝土柱穿过标高59.900,65.400m处悬挑结构,与筒体结构利用型钢混凝土梁连接,定位困难,施工组织难度较大。

3 环形悬挑结构施工方案

24.900,30.000m处悬挑结构由于高度较低,采用落地式满堂脚手架施工;标高59.900,69.450,65.400m处悬挑结构通过搭设辐射型三角托架式操作平台完成下层悬挑结构施工,依托下层悬挑结构实现部分上层结构施工,再通过钢丝绳拉结上层结构后扩展下层施工平台,完成上层剩余悬挑结构施工。

3.1 标高24.900,30.000m处悬挑结构施工

标高24.900,30.000m处悬挑结构下部主要结构包括筒体结构、辅楼及外侧3根弧形钢管柱。在施工标高24.900m处悬挑结构前,将筒体结构先行施工至辅楼梁底,再进行辅楼施工,辅楼采用搭设落地式满堂脚手架施工,随后施工筒体结构至标高24.900m处悬挑结构下方。

标高24.900,30.000m处分别存在3.05~3.45m长水平悬挑结构(悬挑结构形式见图1标高24.900,30.000m处结构),其主环梁尺寸为500mm×1000mm。施工采用在辅楼上部搭设满堂脚手架,脚手架立杆底部设置通长方木,搭设高度为19.95m,3步3跨设置连墙件对架体进行刚性拉结。脚手架架体搭设形式为网状式,立杆与横、径向水平杆采用扣件连接成整体。立杆径、横向间距为900mm,步距为1400mm。标高30.000m以下脚手架剖面如图1所示。

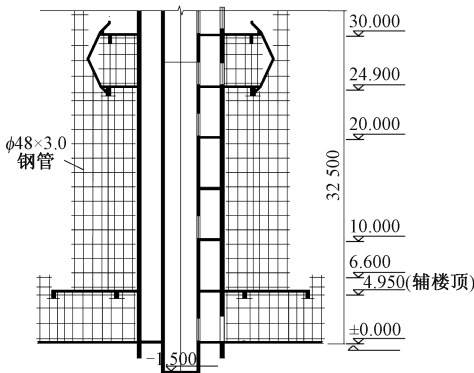


图1 标高30.000m以下脚手架剖面
Fig.1 Scaffolding section at elevation 24.900m

在施工完标高24.900,30.000m处悬挑结构后,施工标高30.000~69.300m筒体结构。标高30.000~69.300m架体从标高30.000m处悬挑结构上开始搭设,围绕筒体结构向外搭设4.5m宽多边形满堂脚手架,此架体主要为标高30.000~69.300m型钢混凝土支撑梁和筒体结构施工提供人员操作平台和安全防护,不作为承重架使用。标高60.000,65.500m处预留悬挑板钢筋,待标高57.600m处筒体结构混凝土强度达100%后安装三角托架式操作平台。

3.2 标高59.900,65.400m处悬挑结构施工

3.2.1 标高59.900m处悬挑结构施工

标高59.900m处悬挑结构施工前,在标高57.600m处搭设辐射型三角托架式操作平台,平台距离悬挑结构板面2.3m。该操作平台主要为在59.900m处安装悬挑结构型钢梁和进行结构梁板施

工的工作人员提供作业平台。操作平台做法为:使用 I20a,I18a 在加工厂制作完成,连接处采用加肋板进行焊接。操作平台与筒体采用高强螺栓连接,沿筒体外侧呈辐射状分布。托架间利用 I18a 通过高强螺栓连接,整个操作平台上铺设木模板封闭,平台外侧设 1.5m 高防护栏杆。操作平台布置如图 2 所示。

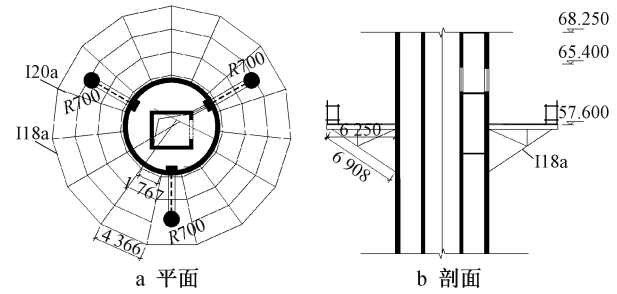


图 2 标高 57.600m 处操作平台布置

Fig. 2 Layout of construction platform at elevation 57.600m

标高 57.600m 处操作平台搭建完成后,开始施工标高 59.900m 处悬挑结构,步骤如下。

1)先安装 3 根径向主型钢梁(H800×300×12×20),将其与筒体和 3 根弧形钢管柱连接。主型钢梁与筒体结构采用 6 根高强螺栓连接,然后安装环向主型钢梁(H800×300×12×20),将其与 3 根弧形钢管柱连接,形成整体结构。主型钢梁如图 3 中虚线部分。

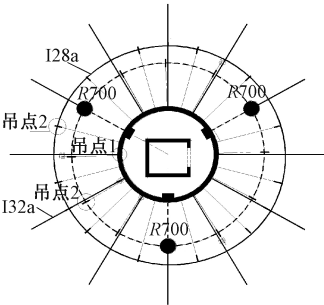


图 3 标高 59.900m 处型钢及辅助工字钢

Fig. 3 Section steel and auxiliary I-beams at elevation 59.900m

2)安装完环向主型钢梁后,型钢梁有 50mm 倾斜。为消除安装过程中产生的倾斜,采用 9 根 $\phi 20$ 钢丝绳斜拉至筒体结构外壁,以纠正此倾斜。

3)架设径向辅助 I32a,工字钢下翼缘标高与混凝土结构板面高度一致。在径向工字钢上架设环向辅助 I28a,如图 3 中实线部分。径向辅助工字钢与 3 根弧形钢管柱及核心筒采用焊接连接,同时利用 9 根钢丝绳将筒体结构与环向辅助工字钢进行拉

结,减少变形,如图 4 所示。

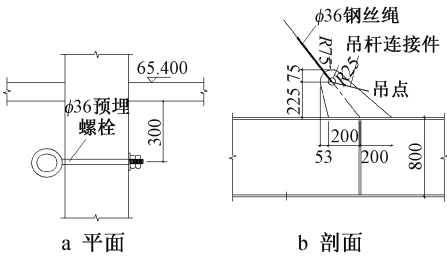


图 4 吊点示意
Fig. 4 Lifting points

4)主型钢梁的型钢作为吊模,而辅助工字钢则利用自身结构辅助支设混凝土梁,第 1 次混凝土浇筑至板面底。主型钢吊模及辅助工字钢吊模分别如图 5,6 所示。标高 59.700~59.900m 结构板采用无支撑体系自撑式可拆卸钢筋桁架模板施工。

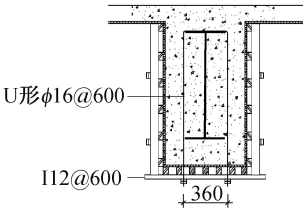


图 5 主型钢吊模

Fig. 5 Main section steel lifting formwork

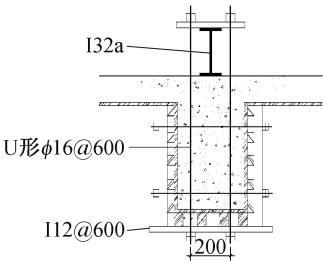


图 6 辅助工字钢吊模

Fig. 6 Auxiliary I-beam lifting formwork

3.2.2 标高 65.400m 处悬挑结构施工

标高 65.400m 处悬挑结构最大外伸约 7.94m,而已完成的 59.900m 处悬挑结构仅长 5.51m,不足以标高 65.400m 处悬挑结构提供全面的支撑。因此,需在 59.900m 处已完成的悬挑结构上继续搭建外伸的外侧钢环梁(见图 7),形成延伸平台。

经过 ABAQUS 有限元软件计算分析发现,标高 59.900m 处结构外侧钢环梁承受上部施工荷载后变形过大,需采用钢丝绳拉结上部核心筒进行卸荷,然而,由于拉结角度的原因,直接将钢丝绳连接至上部核心筒会导致钢丝绳穿过 65.400m 处主型钢梁,施工复杂。因此,标高 65.400m 处悬挑结构梁板分 2 次施工。首先依托下层 59.900m 处已完成

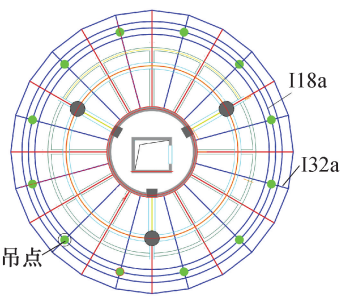


图 7 标高 59.900m 处外侧钢环梁及吊点位置

Fig. 7 External steel ring beam and lifting point location at elevation 59.900m

的悬挑结构施工标高 65.400m 处部分悬挑结构,再通过钢丝绳拉结标高 65.400m 处已完成悬挑结构及标高 59.900m 处扩展施工平台,随后在扩展后的施工平台上完成标高 65.400m 处剩余悬挑结构的施工。标高 65.400m 处悬挑结构施工步骤如下。

1) 标高 59.900m 处结构梁板混凝土浇筑完成后,在原有辐射性型钢梁中间再增加新的径向工字钢梁,径向工字钢梁位于 59.900m 处已浇筑的混凝土结构板上。利用标高 59.900m 处结构板上型钢梁与新的径向工字钢梁,搭设标高 65.400m 处梁板支模架体。新的工字钢搁置在原有环形型钢上方,利用 U 形卡箍相连接,与筒体结构外壁采用高强度螺栓连接。

2) 第 1 次标高 65.400m 处悬挑结构施工半径为 5.3m(为标高 59.900m 处悬挑结构外伸长度,此时下部已施工结构可提供足够支撑),待标高 65.400m 处环形主梁施工完毕后,在标高 59.900m 处外侧安装 4 根 I18a 钢环梁,I18a 钢环梁搁置在原有钢梁上方,两者利用 U 形卡箍连接。穿过新增径向工字钢梁,两者采用高强螺栓连接,图 7 中蓝色线条为新增径向工字钢梁。安装径向工字钢梁后,采用钢丝绳与已完工的标高 65.400m 处环向主型钢梁拉结进行卸荷。标高 65.400m 处悬挑结构施工架体剖面如图 8 所示。

3) 在标高 59.900m 处新增环形工字钢梁上部铺设地板,搭设外围梁板架体,进行标高 65.400m 处悬挑结构剩余结构施工,架体搭设如图 9 所示。

3.2.3 标高 69.450m 处悬挑结构施工

由于标高 69.450m 处外伸水平悬挑结构仅长 4.4m。已完成的标高 65.400m 处悬挑结构施工可为标高 69.450m 处悬挑结构施工提供支撑和操作平台。因此,在标高 65.400m 处楼板上搭设脚手架,以支撑上部模板,立杆间距为 900mm×900mm,步距为 1 200mm,搭设模板浇筑标高 69.450m 处悬

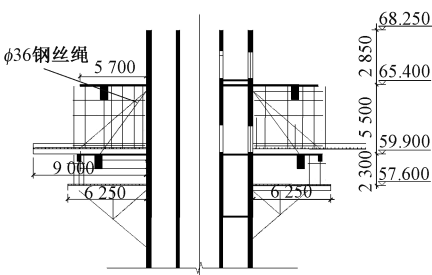


图 8 标高 65.400m 处悬挑结构第 1 次施工架体剖面

Fig. 8 Scaffold section of the first construction for cantilever structure at elevation 65.400m

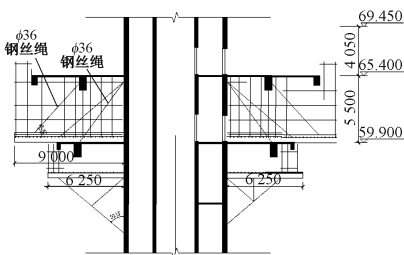


图 9 标高 65.400m 处悬挑结构第 2 次施工架体剖面

Fig. 9 Scaffold section of the second construction for cantilever structure at elevation 65.400m

挑结构。随后直至施工至核心筒顶部,外侧 3 根弧形钢管柱结构与筒体结构同步施工,架体立面如图 10 所示。

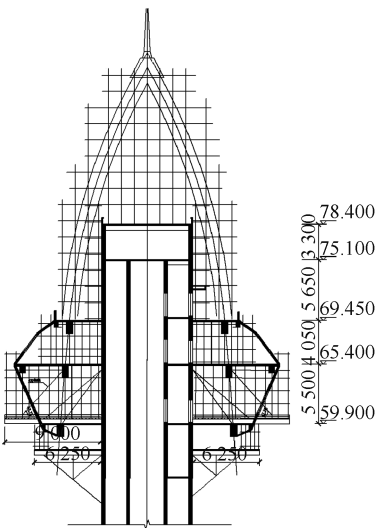


图 10 标高 69.450m 处悬挑结构架体立面

Fig. 10 Scaffold elevation of cantilever structure at elevation 69.450m

4 有限元分析计算

为验证环形悬挑结构施工平台在钢丝绳卸荷状态下的整体受力性能,采用 ABAQUS 软件进行有限元分析。因标高 65.400m 处悬挑结构第 2 次施

工悬挑长度最长,因此选取该阶段工况进行建模,验证下部型钢及临时环形结构平台是否满足强度变形要求。模型中,型钢、钢丝绳及工字钢采用梁单元模拟,混凝土核心筒、径向主型钢梁及环向主型钢梁采用实体单元模拟。

主型钢与工字钢采用 ABAQUS 中相互作用中的绑扎进行连接。施工荷载、架体荷载及上部混凝土荷载在考虑荷载系数后以均布荷载形式添加至下部结构。环形悬挑结构施工平台有限元模拟结果如图 11 所示。

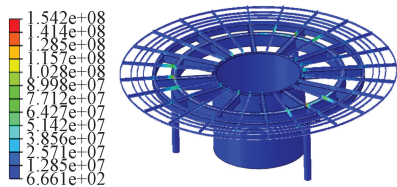


图 11 有限元模拟结果(单位:Pa)

Fig. 11 Finite element simulation results(unit:Pa)

由图 11 可知,最大应力为 154.2MPa<215MPa,受力满足要求,最大应力发生在辐射性辅助工字钢根部。综上所述,环形悬挑支撑架体受力满足要求。

5 结语

本文从高层建筑施工难点出发,针对上宽下窄环形悬挑结构,提出一种适用于高空环形悬挑结构的施工方法。鉴于环形悬挑结构独特设计与功能需求,采用下部先行、上部跟进、分步施工的施工逻辑,通过搭设辐射性三角托架式操作平台完成下层悬挑结构施工,施工完成后,依托其稳定性,部分上层结构得以顺利施工。然后通过钢丝绳将上层结构进行拉结,加强结构整体稳定性,同时扩展下层施工平台,便于后续施工。钢丝绳的使用和合理的安装步骤确保了悬挑结构施工的安全性和稳定性。

参考文献:

[1] 佟克龙. 高层塔楼超大跨度超高空间连体钢结构设计与施工关键技术[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(8): 45-50,67.

TONG K L. Key technology of design and construction of super large span and super high space connected steel structure of high-rise tower [J]. Construction technology, 2023, 52 (8): 45-50,67.

[2] 赵宪忠,沈祖炎,陈以一,等. 上海东方明珠国际会议中心单层球网壳整体模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2000(3): 16-22.

ZHAO X Z, SHEN Z Y, CHEN Y Y, et al. Model test study on single-layer spherical reticulated shell of Shanghai Oriental Pearl International Conference Center [J]. Journal of building structures, 2000(3): 16-22.

[3] 渠亚卿,任文静,邱大鹏. 筒体-环形组合建筑结构安全措施效果研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(5): 1189-1196.

QU Y Q, REN W J, QIU D P. Study on the effect of safety measures for cylinder-ring composite building structure[J]. China earthquake engineering journal, 2023, 45(5): 1189-1196.

[4] 张海林,郭龙川,杨建明,等. 超高层建筑非标层铝木结合模板体系施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(15): 133-137.

ZHANG H L, GUO L C, YANG J M, et al. Construction technology of non-standard layer aluminum-wood combined formwork system for super high-rise buildings [J]. Construction technology, 2023, 52(15): 133-137.

[5] 秦长金,伍刚,刘非凡,等. 落地与悬挑组合式支模体系在高位逐层外悬挑结构施工中的应用 [J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(2): 87-91.

QIN C J, WU G, LIU F F, et al. Application of landing and cantilever combined formwork system in the construction of high-level outer cantilever structure [J]. Construction technology, 2024, 53(2): 87-91.

[6] 金博,章立昌,许越鑫,等. 可周转装配式悬挑工字钢模板支撑架体施工技术 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(14): 120-124.

JIN B, ZHANG L C, XU Y X, et al. Construction technology of supporting frame of cantilevered I-beam formwork with turnover assembly [J]. Construction technology, 2023, 52 (14): 120-124.

[7] 苏军. 钢筋桁架楼承板在加层钢结构工程中的应用[J]. 山西建筑, 2012, 38(35): 117-118.

SU J. Application of steel bar truss floor slab in steel structure engineering[J]. Shanxi architecture, 2012, 38(35): 117-118.