

# 一种空中倒挂三角结构施工方法分析

朱晨迪

(上海建工四建集团有限公司, 上海 201600)

**摘要** 常规混凝土结构施工在原位进行钢筋绑扎后再进行模板排架支护并浇筑混凝土。然而, 对于空中连廊倒挂的三角混凝土结构, 其存在空中缺乏作业面、模板排架支护搭设困难等问题。本文针对这些施工难题, 结合东航金叶苑4#地块项目实际施工过程中的方案策划和选择, 探讨从阶梯式下挂平台、结构体系、型钢自承载模板等方面化解问题, 提出一种经济、安全、高效实现类似倒挂结构施工的方案, 以期为相关人员提供借鉴。

**关键词** 斜撑; 下挂平台; 型钢自承载模板; 劲性结构

**中图分类号**: TU74

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.014

## 0 引言

在建筑工程向高空、异形化发展的趋势下, 空中连廊倒挂三角结构因建筑造型与空间需求应运而生, 却因作业面缺失、模板排架搭设困难, 成为混凝土结构施工的技术难点。常规施工方法或存在节点拼接质量隐患、混凝土开裂风险, 或受限于高空作业条件, 难以兼顾安全性与经济性。本文以东航金叶苑4#地块项目为工程依托, 针对空中连廊倒挂三角劲性混凝土斜撑结构的施工难题, 探讨多种施工方案的适用性, 通过结构优化与施工工艺创新, 提出型钢自承载模板结合地面预制、空中浇筑的施工方法, 为同类空中倒挂结构施工提供技术参考与实践思路。

## 1 工程概况

东航金叶苑4#地块项目钢结构连廊共计五层, 长约29 m、宽约17 m, 与1#A楼一侧剪力墙结构连接于25F-RF、与1#-B楼一侧钢框架结构连接于22F-RF。由于建筑内部视觉效果需求, 连廊为钢框架结构体系, 立面无桁架支撑。其下方设置斜支撑增加结构刚度。

斜支撑为倒挂三角结构, 上端支撑于连廊底部, 下端与1#-A楼连接于20F~25F。由于刚度和强度需求, 斜支撑的原结构形式为三榀倒三角构件通过次梁连接的混凝土+劲性结构<sup>[1]</sup>。

## 2 原结构施工的方法探讨

每榀斜撑除了水平和斜向两根劲性构件, 其余结构为钢筋混凝土构件。因此常规的施工路线有预制提升拼装、地面整体浇筑提升施工和悬挑平台原位施工

等方式, 除此之外, 本文还探讨了一种阶梯式下挂平台原位施工方法。

### 2.1 预制提升拼装施工

预制提升拼装即将斜撑结构拆分成单独构件, 在地面或工厂施工完成后起吊组装。这种方式有以下两个施工难点:

一是构件拼装的湿接头非常复杂。斜撑为倒三角形式, 斜撑自身构件之间、斜撑与主楼之间有大量斜交连接, 因此拼接节点可行性很差, 质量难以保证。

二是预制拼装缺乏施工面。由于斜撑底部悬空, 拼接节点处钢筋和混凝土浇筑施工没有作业面。

### 2.2 地面整体浇筑提升施工

与前述的原位施工不同, 地面整体拼装将连廊倒挂三角结构与连廊自身一起在地面全部完成, 即在地面完成混凝土结构的支护浇筑, 将混凝土构件随钢结构一同提升。但是此方案存在以下两个问题:

1. 混凝土开裂问题。在受拉时, 混凝土的极限应变0.001仅为钢材的弹性应变0.001的十分之一, 提升过程中钢结构可以抵抗较大的变形, 但是混凝土结构和可能开裂。

2. 混凝土节点连接。连廊提升就位后需要进行节点合龙连接, 而混凝土构件的节点合龙对精度要求很高, 此时大量混凝土构件节点的合龙连接面临比预制提升施工更加困难的挑战。

### 2.3 悬挑平台原位施工

1. 平台设计。悬挑平台施工是在1#-A楼一侧设置悬挑平台提供施工作业面。在空中搭设模板排架进行

作者简介: 朱晨迪(1991-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑施工。

原位施工。采用工字钢作为主次梁形成平台底部框架，其中主梁间距以 1.5 m 为主、次梁间距以 0.9 m 为主。工字钢框架上铺设 2 mm 钢板形成平面。在工字钢主梁远端设置型钢斜杆向上拉结至主楼结构。

2. 可行性分析。(1) 荷载统计：其中施工活荷载按 2.5 kN/m<sup>2</sup> 均布于整个施工平台。恒荷载按整个楼层梁板自重均布于施工平台简化计算，根据表 1 计算出恒荷载为 5.68 kN/m<sup>2</sup>。(2) 荷载组合：1.3× 恒荷载 + 1.5× 活荷载（见表 1）。

表 1 楼层构件信息表

|                              |         |         |         |
|------------------------------|---------|---------|---------|
| 楼层面积 (m <sup>2</sup> )       | 129.36  |         |         |
| 梁截面规格 (mm)                   | 400×600 | 400×800 | 300×600 |
| 总长度 (m)                      | 19.8    | 12.67   | 37.886  |
| 混凝土容重取值 (kN/m <sup>3</sup> ) | 25.1    |         |         |

根据建模验算结果，主次梁分别需要采用 25a、18 号工字钢，上拉件需要用到 14 号工字钢才能保证平台承载力满足。并且工字钢主梁最大长度达到了 13.8 m，上拉构件最大达到 15.6 m，总用钢量为 15.3 t。并且由于没有考虑模板排架自重和恒荷载的局部集中分布，根据实际荷载细化计算后，悬挑平台的构件需求截面很可能会更大。

### 2.4 阶梯式下挂平台原位施工方案

1. 下挂平台概述。根据 2.3 节所述，采用结构端型钢悬挑和远端型钢上拉的由于平台支座数量较少导致悬挑平台大且重，不便施工。

针对悬挑平台存在的两个问题，考虑可以借用已经提升施工完成的结构，将平台按施工次序分块并悬挂连接于连廊 25F 钢梁底部，减少平台大小的同时增加支座。如图 1 所示，由于下挂结构为倒三角形，由下向上层层施工的情况下，可以利用已经施工完成的部分作为下一层的施工面，仅需要通过平台提供未能覆盖的待施工区域的施工面<sup>[2]</sup>。

2. 下挂平台原位施工流程。以下借助东航金叶苑 4# 地块项目连廊劲性斜撑来表述下挂平台原位施工流程。

(1) 通过悬挑平台施工 21F 结构；(2) 提升 GPT1 至 21F 已完成结构进行侧向拉结，并完成竖向拉结→提升 GPT2 至同一高度并与 GPT1 拉结，用作防护和操作平台→两个平台固定与拉结完成后，在 21F 已完成结构以及 GPT1 上搭设排架模板进行 22F 结构施工；(3) 22F 结构施工完成→断开 GPT1 与 GPT2 之间的拉结→提升 GPT2 至 22F 与已完成结构做侧向拉结，并完成竖向拉

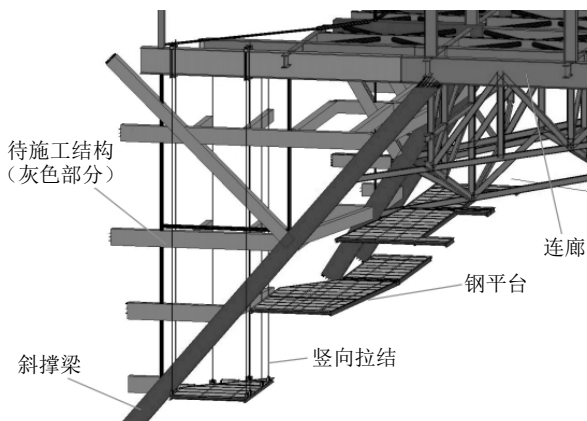


图 1 下挂平台三维模型

结→提升 GPT3 至同一高度并于 GPT2 拉结，用作防护和操作平台→两个平台固定与拉结完成后，在 22F 已完成结构以及 GPT2 上搭设排架模板进行 23F 结构施工；

(4) 23F 结构施工完成→断开 GPT2 与 GPT3 之间的拉结→提升 GPT3 至 23F 已完成结构做侧向拉结，并完成竖向拉结→平台固定与拉结完成后，在 23F 已完成结构以及 GPT3 上搭设排架模板进行 24F 结构施工<sup>[3]</sup>。

3. 下挂平台施工难点。平台拟通过精轧螺纹钢与已提升就位连廊 25F 钢梁连接，平台自身受力已通过验算，因此还需要保证平台竖向连接的安全。根据平台受力计算结果，得到支座反力平均约为 100 kN（设计值），可以采用 φ28 精轧螺纹钢作为平台竖向吊杆。吊杆应力  $\sigma = F/A = 100 \text{ kN}/615 \text{ mm}^2 = 162.5 \text{ MPa} < f_y = 700 \text{ MPa}$ ，可以满足设计，但是如何保证精轧螺纹钢与平台和连廊钢梁有效连接是一难点。

另外，原位施工存在大量高空作业，高空坠落和物体打击风险较大。

## 3 结构优化与型钢自承载模板施工

### 3.1 结构优化—减少混凝土构件

根据前文讨论，倒挂结构中混凝土构件的存在给施工带来了种种困难，但是斜撑强度与刚度的需求使得连廊斜撑无法简化为纯钢构件。因此考虑将连廊主要提供强度和刚度构件加大，并将其他构件改为纯钢构件。如表 2、图 2 所示，劲性构件中横梁称为劲性梁，大斜向构件称为劲性柱，另一个斜向构件称为反拉梁。

### 3.2 型钢自承载模板的设计与施工思路

型钢自承载模板设计与施工思路：经过结构优化之后，连廊倒挂三角结构中含混凝土部分均为劲性构件。通过以劲性结构型钢钢骨来承担模板受力，便可以免拆外部排架搭设，从而解决空中作业面的施工难题。

表2 斜撑劲性构件表

| 构件  | 原截面(内插型钢)                       | 优化后(内插型钢)  |
|-----|---------------------------------|--|
| 劲性梁 | 600×1600<br>(HH1 300×400×25×32) | 700×1 600/700×1 800<br>(H1 300×500×30×40/H1 500×500×30×50) |
| 劲性柱 | 600×900 (H600×400×25×36)        | 600×1 100 (H600×400×25×36)                                 |
| 反拉梁 | 600×600 (\)                     | 600×800 (H400×40×25×30)                                    |
| 其他梁 | 现浇混凝土梁                          | 钢梁   |
| 楼板  | 现浇板                             | 钢筋桁架楼承板  |

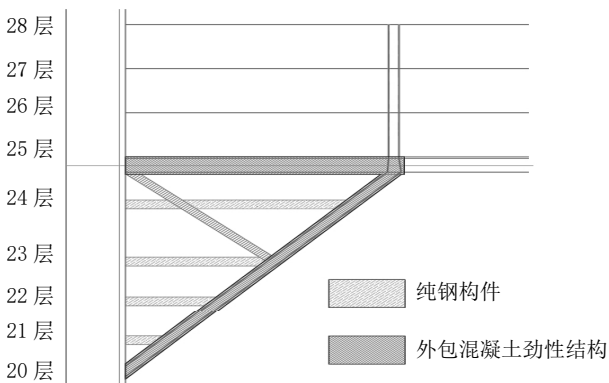


图2 斜撑优化后构件示意图

以钢板作为构件面模,方钢管作为围檩网格,通过拉结螺杆将围檩拉结于型钢钢骨上,从而将混凝土压力按照钢面板、围檩方管、拉结螺杆的次序传递至型钢钢骨,以此实现劲性构件自承载<sup>[4]</sup>。通过该模板设计与结构优化,可以在地面完成全部完成钢连廊和倒挂钢结构施工,其中包括劲性构件的钢骨,然后在地面完成钢筋绑扎和钢模支护,使劲性构件钢筋模板随连廊一起整体提升。

### 3.3 采用型钢自承载模板的斜撑施工方法

1. 施工流程。采用型钢自承载模板后,连廊倒挂结构可以在地面完成大部分钢筋模板施工,待连廊提升连接完成后进行合龙节点处钢筋、模板连接,最后在空中通过钢模浇筑口完成混凝土结构施工。

2. 型钢自承载施工部分。连廊倒挂结构钢结构完成后,首先进行劲性构件拉结螺杆焊接固定,完成后进行钢筋绑扎和钢模安装。

连廊提升就位以及钢结构合龙完成后,进行劲性构件合龙连接处钢筋模板补缺,最后在钢模浇筑口处进行混凝土浇筑<sup>[5]</sup>。

3. 型钢自承载模板施工优势。型钢自承载模板免除了倒挂结构含混凝土部分构件外部排架支护,并尽可能地将施工内容转移至连廊地面拼装阶段,免除了大量的空中作业工作,降低施工难度和风险。同时与

预制构件合龙连接不同,混凝土浇筑施工在连廊提升连接后再进行施工,降低了劲性节点连接难度的同时提高了劲性构件混凝土的整体性。

## 4 结束语

本文通过对含有钢筋混凝土构件的连廊倒挂三角结构预制提升拼装、地面整体浇筑提升和悬挑平台原位施工方法的讨论以及阶梯式下挂平台原位施工方法的探讨(其中阶梯式下挂平台的施工方法若是能够解决精轧螺纹钢与平台、结构之间有效连接的问题,应作为一种可行的方案),在倒挂结构强度、刚度高需求的前提下,得到将混凝土构件改为纯钢构件并保留劲性构件的结构优化思路,并通过针对空中倒挂劲性构件设计型钢自承载免拆模板的设计,使劲性构件的“钢筋模板工程”和“混凝土工程”工序在空间上实现分离,最终得出钢构拼装、钢筋模板工程地面施工,混凝土工程空中施工的创新性施工方法。该方法从减少空中作业量,降低连廊带混凝土结构的节点合龙难度以及提高施工效率等方面形成了一种针对空中倒挂结构可行、可靠的方案。

## 参考文献:

- [1] 陆开锋. 高空大跨度劲性混凝土连廊综合施工技术[J]. 江苏建筑, 2020(05):69-71,85.
- [2] 李文盛,张继承,何磊,等. 高空超限型钢混凝土梁本体悬挂平台支模技术研究[J]. 结构工程师, 2022,38(04):169-175.
- [3] 陈康,李成飞,杨金勇,等. 型钢混凝土梁模板支设的优化设计[J]. 建筑技术, 2024,55(18):2270-2273.
- [4] 牛牧野. 大跨度高空混凝土连廊施工技术应用[J]. 建筑机械, 2025(09):222-224.
- [5] 姜焱,朱效民,韩永明,等. 大跨度悬挑混凝土结构高空支模平台施工技术[J]. 建筑技术, 2023,54(18):2252-2254.