

DOI: 10.7672/sgjs2026080042

大跨度劲性悬挑桁架自承式模板支撑体系施工技术*

孙晓阳^{1,2}, 左岗^{1,2}, 吕有本^{1,2}, 胡晚亭^{1,2}, 罗祥祥^{1,2}

(1. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200112;

2. 中建八局文旅博览投资发展有限公司, 江苏 南京 211100)

[摘要] 大跨度劲性悬挑桁架结构在大型场馆、会展中心和机场等建筑物中得到了广泛应用。大型公共建筑由于施工工期短、建筑造型复杂、施工技术难度大, 模架支撑方案的确定往往较为重要。以无锡奥体中心体育场劲性悬挑桁架模板支撑体系为例, 通过对模板支撑体系变形分析与劲性桁架结构的应力验算, 确定模板支撑体系的加固形式及成型效果。

[关键词] 支撑; 大跨度; 桁架; 模板; 加固; 施工技术

[中图分类号] TU755.2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0042-04

Construction Technology of Large-span Strength Suspension Truss Self-supporting Formwork Support System

SUN Xiaoyang^{1,2}, ZUO Gang^{1,2}, LÜ Youben^{1,2}, HU Wanting^{1,2}, LUO Xiangxiang^{1,2}

(1. China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Shanghai 200112, China;

2. Cultural Tourism Expo Investment Development Co., Ltd. of CSCEC 8th Bureau, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: Large-span rigid cantilever truss structures have been widely applied in large venues, convention centers, and airports. Due to short construction periods, complex architectural shapes, and high technical difficulty of large-scale public buildings in construction, the determination of formwork support schemes is often crucial for large public buildings. Taking the formwork support system of the rigid cantilever truss in Wuxi Olympic Center Stadium as an example, this paper conducts deformation analysis of the formwork support system and stress calculations for the rigid truss structure to determine the reinforcement form and shaping effect of the formwork support system.

Keywords: supports; large span; trusses; formwork; reinforcement; construction

1 工程概况

无锡奥体体育场建设规模约6万个座位, 为甲级大型体育场馆, 总建筑面积110732m²。无锡奥体中心体育场劲性悬挑桁架为型钢混凝土组合结构, 最大施工高度为48.400m, 截面尺寸为1200mm×(1600~2000)mm变截面。悬挑结构施工难度大, 风险较高, 针对此特点, 研究并确定合适的模板支撑体系显得尤为重要。劲性悬挑桁架共64榀, 高度为32.356~48.400m, 呈南北低, 东西高的整体马鞍形, 通过环向构件连成整体, 柱、梁、弦杆、腹杆均采用现浇钢筋混凝土或型钢混凝土, 劲

性悬挑桁架效果如图1所示。悬挑桁架的杆件采用由下至上逐渐减小的变截面, 主要受力的斜杆倾角最大高达55.47°, 变截面且倾角大给后续的支模施工操作带来了相当大的困难。在此基础上, 开展对大跨度悬挑桁架的模板支撑体系和施工平台的一系列技术研究。

2 模板支撑体系选型

大跨度悬挑劲性桁架钢混组合结构造型由内往外延伸, 桁架高度为32.356~48.400m, 倾角55.47°, 截面尺寸为1200mm×(1600~2000)mm变截面, 投影形状近似椭圆形。该桁架的主要特点是形状不一, 倾角大且杆件的截面尺寸较大。传统的盘扣架体为固定模数, 立杆间距布置较密, 搭设高度较高且无法抵抗大斜柱的水平分力。常规的定型钢模板自重大, 高空作业安装难度大, 考虑到

* 2024年度江苏省建设系统科技项目: 大型生态体育场馆智能建造技术与应用(2024JH-89)

[作者简介] 孙晓阳, 正高级工程师, 国家一级注册建造师, 国家注册安全工程师, E-mail: xuanyuanyang@163.com

[收稿日期] 2025-08-27



图1 劲性悬挑桁架效果

Fig. 1 Rendering of the stiffened cantilever truss

每跨悬挑桁架的形状不一,定型钢模板周转率极低,施工成本大幅增加。因此,确定适合的模板支撑体系成为大悬挑桁架施工难题。

经过多方论证和方案比选,拟采用自承式吊模作为大悬挑桁架施工的模板支撑体系,如图2所示。该模板支撑体系的吊杆采用 $\phi 20$ 圆钢,一端车丝,一端焊接在劲性钢骨柱上。吊杆焊接牢固后,安装模板、木方、双拼钢托梁、垫片及螺母。混凝土荷载通过吊杆支撑系统传递至劲性钢骨柱上,进而通过已浇筑的混凝土柱传递至基础。此模板支撑系统可以避免投入大量的盘扣,且模板、木方、双拼托梁周转率高,施工操作方便,经济安全。

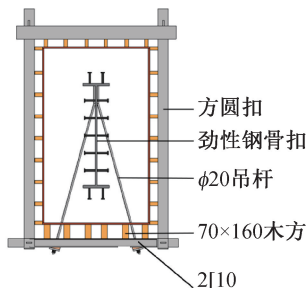


图2 自承式吊模

Fig. 2 Self-supporting suspended formwork

3 自承式吊模支撑系统设计

大跨度劲性悬挑桁架主要受力体系采用 $\phi 20$ 圆钢吊杆,吊杆与劲性钢骨柱焊接牢固后,安装18mm厚黑色覆膜板,次龙骨为70mm×160mm定制木方,主龙骨为2[10钢托梁。吊杆一端双面焊接,焊接长度 $\geq 5d$ (d 为钢筋直径),另一端车丝,螺母紧固后丝杆外露长度 ≤ 10 mm。沿斜柱方向,吊杆间距 ≤ 900 mm,钢骨柱的主要截面尺寸为H1 100×300×20×25,材质为Q355B钢,吊模剖面如图3所示。

自承式吊模计算采用MIDAS Gen 2022计算软件,根据模板支撑体系的设置参数,对钢骨柱施工约束,建立计算模型。

经建模计算分析,钢骨柱应力最大值、木材应

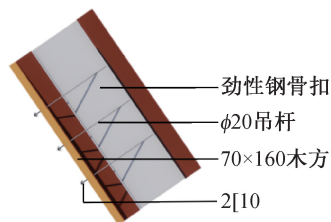


图3 劲性悬挑桁架吊模剖面

Fig. 3 Cross section of the stiffened cantilever truss suspended formwork

力最大值、钢构件竖向变形最大值、构件应力比等数据如表1所示,建模计算所得吊模支撑体系应力云图如图4所示。

表1 应力计算分析值及允许值

Table 1 Calculated stress values and allowable values

项目	计算值	允许值
钢骨柱应力最大值/($N \cdot mm^{-2}$)	85.34	305
木材应力最大值/($N \cdot mm^{-2}$)	8.04	15.44
钢构件竖向变形最大值/mm	4.24	33.75
构件应力比	0.36	1

因此,该模板支撑体系的强度、刚度、稳定性均满足要求。

4 自承式吊模支撑系统施工技术

4.1 施工准备

1) 考虑到大跨度悬挑桁架吊模为非常规支模体系,且荷载较大,该方案组织专家论证后,方可用于指导现场施工。

2) 统计每榀桁架的截面尺寸,计算吊杆的加工长度,并对不同长度的吊杆进行分类编号。

3) 根据钢骨柱的分节吊装和混凝土浇筑顺序,统筹吊杆、模板、木方、钢托梁以及配套螺母、垫片等材料的进场验收。

4.2 测量、放样

1) 本工程平面控制网按照一级导线的精度要求进行测设。

2) 根据施工图纸提前计算出斜柱控制点的三维平面坐标,在钢骨柱柱顶中心和柱顶翼缘板四周,用油漆笔做好标记。吊装校正过程中,将棱镜置于控制点上,逐一测设,直至全站仪所测坐标与设计坐标值相吻合。

4.3 钢骨柱安装

悬挑劲性桁架的钢骨柱分段吊装,最大分节重约13.4t,根据施工部署,采用350t履带式起重机场外吊装,吊装半径64m时,最大吊重17.4t,满足吊装要求。

吊装到位后,将柱身中心线与下节柱的中心线

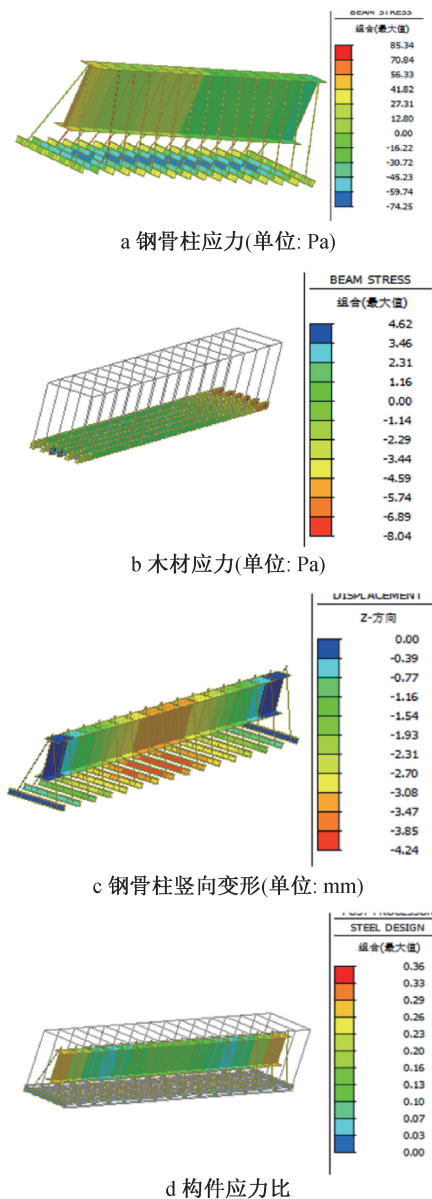


图4 吊模支撑体系受力分析

Fig. 4 Force analysis of the suspended formwork support system

对齐,四面兼顾,利用安装连接板临时固定。若上、下柱出现错口,采用千斤顶顶推方式矫正,如图5所示。斜柱校完后,坡口全熔透焊接。

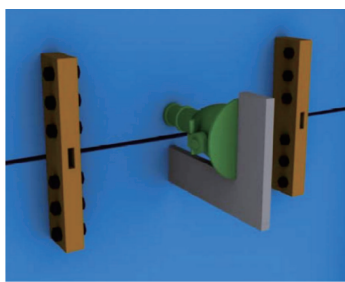


图5 上、下柱错边矫正

Fig. 5 Upper and lower column misalignment correction

4.4 吊杆焊接

提前在钢骨柱上标记好吊杆位置,间距 $\leq 900\text{mm}$ 。为保证焊接质量, $\phi 20$ 圆钢吊杆与型钢柱采用二氧化碳气体保护焊。根据GB 50901—2013《钢-混凝土组合结构施工规范》规定:焊缝宽度不得小于钢筋直径的0.6倍,焊缝厚度不得小于钢筋直径的0.35倍。焊接采用双面焊接,焊接长度 $\geq 5d$ (d 为钢筋直径),焊接时各尺寸如图6所示,图中 L 为搭接长度, d 为钢筋直径, b, s 为焊缝宽度。

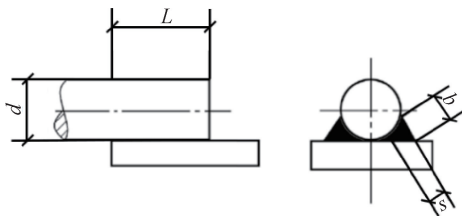


图6 吊杆与型钢焊缝焊接节点

Fig. 6 Welding joint of suspension rods and steel welds

焊缝焊接质量及允许偏差应符合表2规定。

表2 焊接尺寸偏差允许值

Table 2 Allowable deviation of welding dimensions

项目	允许偏差/mm
焊缝厚度	$0/+0.05d$
焊缝宽度	$0/+0.1d$
焊缝长度	$-0.3d$
咬边深度	0.5

4.5 钢筋安装

劲性桁架钢筋层数多、规格大、间距密。利用Tekla建立三维模型,钢筋与钢骨柱节点如图7所示,分析桁架钢筋节点,统筹钢筋安装先后顺序,避免因安装顺序不当,导致节点钢筋与搭筋板无法焊接。

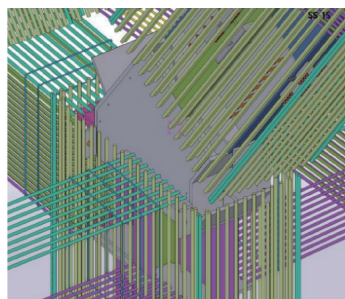


图7 钢筋与钢骨柱节点

Fig. 7 Reinforcement and steel column joint

4.6 安装支模体系

1) 搭设盘扣架体,纵横间距 $0.9\text{m} \times 1.2\text{m}$,步距 1.5m ,仅作为高区现浇看台支撑架,Ⓔ轴外侧盘扣架体作为作业架,并在合适的位置设置定型化上人通道,方便工人施工。

2) 围绕劲性柱每隔 1.5m 设置操作平台,满铺

钢笆片,保证工人安全施工。架体及平台的搭设高度跟现场施工进度保持一致。

3)安装模板支撑系统。在吊杆上标出底模、次龙骨、主龙骨的标高,先安装底模,然后安装主龙骨并临时固定,再在底模和主龙骨之间安装次龙骨。

4)安装主龙骨 2[10 钢托梁。2[10 间距应和吊杆位置保持一致。钢托梁通过吊杆、钢垫片、双螺母紧固形成支撑系统。

5)安装次龙骨 70mm×160mm 木方。控制木方间距 ≤ 250 mm,保证设置均匀。吊杆与木方位置冲突时,可适当调整木方位置。

6)钢垫片与钢托梁之间的缝隙设置楔形垫块塞实。

7)其中三面模板采用普通方圆扣加固,主龙骨长边异形加厚采用方圆扣,短边方圆扣采用 10 号 25mm 厚标准方圆扣,最底层 200mm 1 道,其他位置间距为 300mm。悬挑桁架节点处侧模板加固则需采用常规的对拉螺栓紧固,自承式吊模加固模型如图 8 所示。

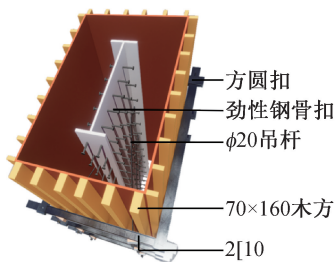


图 8 自承式吊模加固模型

Fig. 8 Model of self-supporting suspended formwork reinforcement

8)无钢骨的弦杆,采用常规盘扣支撑架体系施工。已浇筑的劲性悬挑桁架横梁混凝土强度达到设计强度的 80%,安装盘扣立杆。搭设的架体应与四周架体可靠拉结,且设置抵抗架体水平分力的斜支撑,保证架体稳定。

4.7 混凝土浇筑

1)混凝土浇筑过程中需严格控制施工荷载,混凝土自重荷载不超过 $24\text{kN}/\text{m}^3$,钢筋自重荷载 $\leq 1.1\text{kN}/\text{m}^3$,施工人员及设备荷载 $\leq 3\text{kN}/\text{m}^2$ 。

2)混凝土浇筑过程中需严格控制浇筑顺序。

3)为保证混凝土成型效果,部分劲性悬挑桁架节点位置可采用同强度等级的自密实混凝土浇筑。

4.8 监测措施

利用传感器和监测设备的数据分析技术,对钢骨柱的应力、变形等参数在混凝土浇筑时进行连续监测,将监测值与设计模拟值进行对比,确保结构安全。

4.9 养护

养护一般采用覆膜保湿、喷涂养护液或者覆盖毛毡养护,养护周期 $\geq 14\text{d}$ 。

4.10 拆模

侧模在混凝土强度能保证构件表面及棱角不因拆除模板而受损坏后方可拆除,依次拆除主龙骨方圆扣、次龙骨木方、侧模板;对于底模,混凝土强度达到设计强度的 100%方可拆除,先卸下 1 颗螺母,再将另 1 颗螺母向下调节,抽出次龙骨木方,再卸下第 2 颗螺母,依次拆掉主龙骨双拼钢、底模板,最后,割除露出的吊杆,并涂刷防锈油漆,砂浆抹平。

4.11 注意事项

1)在施工前,应准备编制专项施工方案,组织专家论证并进行交底,明确模板支撑体系的可行性及参数。

2)竖向结构与水平结构分开浇筑,以利用其与支撑架体连接,形成可靠整体;在立杆中间有结构柱的部位,按水平柱网间距、竖向间距每两步距高度与框架柱设置 1 个固结点。

3)吊杆采用 HPB300 级 $\phi 20$ 钢筋,提前计算钢筋加工长度,编号做好标记。材料进场时,履行材料进场验收制度。

4)吊杆焊接采用二氧化碳气体保护焊,操作人员应为专业焊工,持证上岗。

5)为保证混凝土成型质量,吊杆与模板孔用成品橡胶垫封堵。

6)混凝土浇筑前,及时通知测量人员复测钢骨柱,防止型钢柱偏位。

5 结语

由于无锡奥体中心体育场劲性悬挑桁架结构悬挑桁架大小不一,截面多样,倾斜角度大。自承式吊模支撑体系施工利用劲性钢骨柱自承重的特点,克服了变截面、大悬挑、施工荷载超限的困难,解决了高空大截面劲性悬挑桁架施工的难题。实践证明,该模板支撑体系安全、经济、操作简单,具有一定的推广意义。

参考文献:

- [1] 张生智. 建筑高处大悬挑结构模板支撑架施工技术分析[J]. 河南科技, 2022, 41(4): 66-69.
ZHANG S Z. Analysis on construction technology of formwork support frame of large cantilever structure at high altitude [J]. Henan science and technology, 2022, 41(4): 66-69.
- [2] 张有振,王振兴,陈红,等. 承插型盘扣式模板支撑架稳定承载性能有限元分析[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(20): 85-89.

- GAO B, WANG Q, WANG M, et al. Research on performance of combined structures for typical deck pavement at home and abroad[J]. Technology of highway and transport, 2011, 27(2): 43-47.
- [6] 于新, 刘云, 吴建涛. 混凝土箱梁桥沥青混凝土铺装层温度应力分析[J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(4): 99-102, 106.
YU X, LIU Y, WU J T. Thermal stress analysis of asphalt concrete pavement on concrete box girder bridge[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(4): 99-102, 106.
- [7] 苏子元. 寒区钢桥面浇注式沥青混凝土低温指标及铺装技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
SU Z Y. Study on steel bridge deck gussasphalt low-temperature index and pavement technology in cold regions[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [8] 逯彦秋, 陈宜言, 孙占琦. 改善钢桥面铺装层高温作用的有效措施[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(7): 115-119.
LU Y Q, CHEN Y Y, SUN Z Q. Effective measures to lower the temperature for steel bridge deck pavement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(7): 115-119.
- [9] 张利东, 曹健, 张羽彤, 等. 季冻区中小跨径钢桥面铺装的力学响应[J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37(6): 38-43.
ZHANG L D, CAO J, ZHANG Y T, et al. Mechanical responses of steel deck pavement on small-medium span bridges in seasonally frozen area[J]. Road machinery & construction mechanization, 2020, 37(6): 38-43.
- [10] FAN L, YANG W P, ZHOU D, et al. Temperature distribution and mechanical response of orthotropic steel bridge deck during paving of gussasphalt pavement[J]. International journal of steel structures, 2021, 21(1): 315-328.
- [11] LI Z X, CHAN T H T, KO J M. Fatigue damage model for bridge under traffic loading: application made to Tsing Ma Bridge[J]. Theoretical and applied fracture mechanics, 2001, 35(1): 81-91.
- [12] 肖秋明, 查旭东. 沥青混凝土钢桥面铺装的剪切分析[J]. 中南公路工程, 2000, 25(1): 53-54.
XIAO Q M, ZHA X D. Shear analysis of asphalt concrete steel bridge deck pavement[J]. Central south highway engineering, 2000, 25(1): 53-54.
- [13] 钱振东, 黄卫, 茅荃, 等. 南京长江第二大桥钢桥面铺装层受力分析研究[J]. 公路交通科技, 2001, 18(6): 43-46.
QIAN Z D, HUANG W, MAO Q, et al. Mechanical analysis of Nanjing Second Yangtze River Bridge deck pavement[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2001, 18(6): 43-46.
- [14] 王民, 肖丽, 胡德勇, 等. 钢桥面浇注式+SMA组合结构车辙变形深度预估[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 10-18.
WANG M, XIAO L, HU D Y, et al. Prediction of rutting depth of steel bridge deck pavement composite structure using gussasphalt + SMA[J]. China journal of highway and transport, 2021, 34(6): 10-18.
- [15] 杨军, 朱浩然, 崔娟. 钢桥面铺装混合料三轴重复加载试验变形特性[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(6): 24-28.
YANG J, ZHU H R, CUI J. Deformation properties of asphalt mixtures for steel bridge deck through repeated load triaxial test[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2008, 8(6): 24-28.
- [16] 丁子豪. 基于高性能改性沥青的钢桥面铺装体系研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
DING Z H. Research on the steel bridge deck pavement based on high-performance modified asphalts[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [17] GUO K, LIANG J W, HAN X, et al. Numerical simulation of double deck pavement for long-span cable-stayed bridge[J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2020, 568(1): 012001.
- [18] 钱振东, 罗剑, 敬森森. 沥青混凝土钢桥面铺装方案受力分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 61-64.
QIAN Z D, LUO J, JING M M. Mechanical analysis of asphalt concrete paving projects on steel bridge deck[J]. China journal of highway and transport, 2005, 18(2): 61-64.

(上接第45页)

- ZHANG Y Z, WANG Z X, CHEN H, et al. Finite element analysis of stable bearing performance for socket-type disc lock formwork support frame[J]. Construction technology, 2025, 54(20): 85-89.
- [3] 陈达贤, 潘文智, 赵文雁, 等. 双向大跨度悬挑结构拆撑方案对比研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(2): 71-75.
CHEN D X, PAN W Z, ZHAO W Y, et al. Comparative research on two-way large-span cantilever structure dismantling support scheme[J]. Construction technology, 2025, 54(2): 71-75.
- [4] 厉天数, 何一军, 史磊斌, 等. 高空大跨度型钢混凝土组合结构模板支撑体系施工技术[J]. 施工技术, 2014, 43(2): 84-87.
LI T S, HE Y J, SHI L B, et al. Construction of the formwork supports of the large-span steel reinforced concrete composite at high altitude[J]. Construction technology, 2014, 43(2): 84-87.
- [5] 朱为亮. 高层大悬挑混凝土结构施工方案设计与实施[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHU W L. The design and implementation of the construction technology of the large-span cantilevered concrete structure of the high-rise building[D]. Chongqing: Chongqing University 2012.
- [6] 郭正兴, 温科, 陈安英. 盘扣式钢管模板支撑架高效应用技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(17): 67-70, 130.
GUO Z X, WEN K, CHEN A Y. Efficient application technology of disc buckle steel pipe formwork support frame[J]. Construction technology, 2024, 53(17): 67-70, 130