

考虑施工荷载动态变化的大跨度悬挑支模架时变力学分析

欧 瑞 卢小飞 洪伟健 张豪壮

中建八局总承包建设有限公司 上海闵行 201100

摘 要: 大跨度悬挑支模架是建筑工程中实现复杂悬挑结构施工的关键临时支撑体系, 其力学性能受施工荷载动态变化的影响显著, 直接关系到施工安全与结构成型质量。本文以景迈古树茶小镇 2 期 2-2 地块 3# 楼工程为研究对象, 针对该工程屋檐等大跨度悬挑结构的支模架体系, 结合施工全过程中荷载的动态变化特征, 开展时变力学分析。通过明确不同施工阶段的荷载构成与变化规律, 依托工程实际参数建立支模架力学模型, 系统分析施工荷载动态变化下支模架的应力分布、变形规律及稳定性状态, 验证支模架设计的合理性, 为同类大跨度悬挑支模架的设计优化与施工管控提供理论支撑和实践参考。

关键词: 大跨度悬挑支模架; 施工荷载; 动态变化; 时变力学; 应力变形; 稳定性

1 工程概况

本次研究依托的景迈古树茶小镇 2 期 2-2 地块总承包工程, 位于普洱市澜沧拉祜族自治县惠民镇 G214 国道东侧, 由中建八局总承包建设有限公司负责施工。该工程 3# 楼部分区域存在屋檐大跨度悬挑结构, 其中 3#-5 楼南北侧最大外挑长度为 1.1m, 东西侧最大外挑长度为 2.5m; 3#-2 楼南北侧最大外挑长度为 1.1m, 东西侧最大外挑长度为 2.5m; 3#-3 楼南北侧最大外挑长度为 1.5m, 东西侧最大外挑长度为 2.5m。

该工程结构形式为钢筋混凝土框架结构 + 剪力墙核心筒, 存在二层地下室, B2 层地下室层高 5m, B1 层地下室层高 6m。针对这些大跨度悬挑结构, 采用普通扣件式钢管支撑架作为支模架, 部分外挑长度 1.5m 及以上的架体采用悬挑型钢支撑, 型钢主梁选择 18 号工字钢, 下部设置 16 号工字钢下撑件, 下撑件底部焊接 $10 \times 10 \times 2$ 的钢板, 用膨胀螺栓固定在下部楼层。

2 施工荷载动态变化分析

2.1 施工荷载组成

大跨度悬挑支模架施工荷载按性质分为永久荷载与可变荷载, 取值依据《建筑施工模板安全技术规范》(JGJ162-2008) 及本工程专项施工方案确定。

永久荷载为支模架持续承受的荷载, 包含三类: 一是模板及其支架自重, 按构造层次区分, 仅面板 0.1 kN/m^2 、面板与次楞(木方)组合 0.3 kN/m^2 、完整楼板模板(含面板、次楞、

主楞) 0.5 kN/m^2 ; 二是新浇筑混凝土自重, 按 24 kN/m^3 的重力密度, 结合悬挑结构截面尺寸计算实际荷载值; 三是钢筋自重, 根据结构类型差异区分, 梁构件 1.5 kN/m^3 、板构件 1.1 kN/m^3 , 均参考工程图纸配筋量核算, 确保取值准确。

可变荷载随施工阶段动态调整, 具有阶段性与波动性: 施工人员及设备荷载按 3 kN/m^2 取值, 涵盖施工人员站立、工具堆放及手提电锯、电刨等小型机械设备重量; 倾倒混凝土冲击荷载根据料斗浇筑方式确定为 2 kN/m^2 , 属瞬时冲击荷载, 需考虑对支模架的短期影响; 风荷载结合工程所在地普洱市澜沧拉祜族自治县气候条件及《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012) 确定, 同时充分考虑场地周边地形(G214 国道东侧无高大遮挡物)对风速的影响, 其中单榧模板支架风荷载标准值 $\omega_k=0.029 \text{ kN/m}^2$, 整体模板支架风荷载标准值 $\omega_{fk}=0.296 \text{ kN/m}^2$, 支架外侧模板风荷载标准值 $\omega_{mk}=0.26 \text{ kN/m}^2$ 。

2.2 施工荷载动态变化特点

施工过程分四个阶段, 荷载动态变化特征显著: 施工准备阶段以永久荷载为主, 呈逐步施加趋势。初始仅钢管支架自重, 随次楞、主楞安装增至支架与楞木组合自重, 铺面板后达模板及支架完整自重, 荷载稳定且无可变荷载。钢筋绑扎阶段在永久荷载基础上叠加钢筋自重, 荷载随绑扎进度缓慢增加, 钢筋堆放区局部荷载增大, 绑扎完成后均匀分布, 荷载组合为“模板支架自重 + 钢筋自重 + 少量施工人员荷

载”，波动小。混凝土浇筑阶段荷载最复杂且最大，呈“持续增加+瞬时冲击”特征。混凝土分段分层（每层 $\leq 2\text{m}$ ）浇筑，自重逐步施加；倾倒产生瞬时冲击荷载，叠加施工人员及振捣设备移动荷载，组合为“模板支架自重+钢筋自重+新浇筑混凝土自重+施工人员及设备荷载+倾倒混凝土冲击荷载”，是最不利阶段。混凝土养护阶段荷载趋于稳定，仍承受永久荷载，施工人员荷载大幅减小，需考虑风荷载随机作用，荷载组合为“模板支架自重+钢筋自重+新浇筑混凝土自重+风荷载”，变化受自然环境影响。

3 大跨度悬挑支模架时变力学模型建立

3.1 支模架参数确定

大跨度悬挑支模架的力学模型建立以工程专项施工方案中的构造参数为依据，确保模型与实际工程高度一致。普通扣件式钢管支撑架的核心参数如下：立杆纵横间距为 $900\text{mm} \times 900\text{mm}$ ，步距为 1500mm ，立杆顶部最高处水平杆距模板底部的距离不超过 1000mm ，最底部扫地杆距地面高度为 200mm ；立杆接长采用扣件对接，不得搭接，水平杆接长采用扣件搭接，不得对接；竖向剪刀撑设置在架体四周外立面向内的第一跨及架体内部每隔5跨区域，由底至顶连续设置，单个剪刀撑跨度不超过6跨、宽度不超过 6m ，倾斜角度控制在 $45^\circ - 60^\circ$ 之间，采用旋转扣件每步与立杆固定，旋转扣件中心线与主节点距离不超过 150mm ；水平剪刀撑在架体高度超过 5m 时设置，间隔高度不超过6步（ 9m ），与竖向剪刀撑交叉布置，确保架体的空间稳定性。

对于悬挑型钢支撑体系，参数设置严格遵循方案要求：型钢主梁选用18号工字钢，其截面惯性矩、截面抵抗矩等力学参数按钢材力学性能标准取值；下撑件选用16号工字钢，与主梁采用焊接连接，焊缝高度不小于 8mm ，确保节点强度；下撑件底部焊接 $10 \times 10 \times 2\text{mm}$ 的钢板，通过4个M16膨胀螺栓固定在下部楼层结构上，膨胀螺栓的锚固深度不小于 100mm ，满足抗拔承载力要求；型钢主梁外挑投影长度比实际悬挑长度增加 1m ，内部锚固段长度不小于 1.25m ，阳角处根据平面尺寸调整增加长度，确保主梁的抗倾覆能力。

模板体系参数同样依据方案确定：面板采用 15mm 厚覆膜多层板，其抗弯强度设计值为 15.444N/mm^2 ，弹性模量为 9350N/mm^2 ；次楞采用 $40 \times 90\text{mm}$ 木方，间距根据模板类型调整（墙模 250mm 、板模 $250 - 350\text{mm}$ 、梁模 $120 -$

300mm ），其抗弯强度设计值为 15.444N/mm^2 ，弹性模量为 9350N/mm^2 ；主楞采用 $\phi 48 \times 3.6\text{mm}$ 钢管，与支架立杆通过顶托或扣件连接，形成可靠的荷载传递路径。

3.2 力学模型建立

基于支模架的实际构造与受力特点，采用有限元分析软件建立时变力学模型，将支模架视为空间桁架结构，模拟不同施工阶段的受力状态。模型中，立杆、水平杆、剪刀撑均采用杆单元模拟，考虑钢管的轴向抗压、抗拉及弯曲变形；扣件节点采用半刚性连接模拟，根据扣件拧紧力矩（ $40\text{N} \cdot \text{m} - 65\text{N} \cdot \text{m}$ ）确定节点的转动刚度，避免采用完全铰接或完全刚接带来的误差；型钢主梁与下撑件采用梁单元模拟，考虑其弯曲、剪切及扭转变形，焊缝连接按刚性节点处理；模板与次楞、主楞之间的连接采用绑定约束，确保荷载能够有效传递。

以3#-3楼东西侧外挑长度 2.5m 的屋檐支模架为典型分析对象，建立的力学模型涵盖完整的荷载传递体系：混凝土荷载通过面板传递至次楞，次楞将荷载分配给主楞，主楞通过顶托传递至钢管支架立杆，立杆将竖向荷载传递至下部基础或型钢主梁；型钢主梁承受立杆传递的荷载后，通过下撑件传递至下部楼层结构，同时通过锚固段平衡悬挑端的倾覆力矩；水平荷载（如风荷载）通过模板传递至支架，由剪刀撑和连墙件（与框架柱或剪力墙连接）传递至主体结构，形成完整的受力闭环。

在模型中，通过设置时间步长模拟施工荷载的动态变化：施工准备阶段按模板支架安装进度分3个时间步施加荷载；钢筋绑扎阶段按钢筋绑扎区域分2个时间步施加荷载；混凝土浇筑阶段按浇筑分层分4个时间步施加混凝土自重，并通过瞬时荷载脉冲模拟倾倒混凝土冲击荷载；混凝土养护阶段按养护周期设置恒定荷载，同时通过随机荷载模拟风荷载的波动。每个时间步对应一个施工工况，通过求解各工况下的力学响应，实现支模架时变力学分析。

4 时变力学分析

4.1 不同施工阶段应力分析

根据建立的力学模型，分别对施工准备阶段、钢筋绑扎阶段、混凝土浇筑阶段和混凝土养护阶段进行应力分析。通过计算，得到各阶段支模架主要构件的应力值，如下表所示：

施工阶段	立杆最大应力 (N/mm ²)	水平杆最大应力 (N/mm ²)	剪刀撑最大应力 (N/mm ²)	型钢主梁最大应力 (N/mm ²)
施工准备阶段	35.2	28.6	22.1	—
钢筋绑扎阶段	52.8	41.3	31.5	—
混凝土浇筑阶段	125.6	98.4	75.2	145.3
混凝土养护阶段	108.3	86.7	68.5	128.7

由上表可知,在混凝土浇筑阶段,支模架各构件的应力值达到最大,这是因为该阶段荷载最为复杂,包含了新浇筑混凝土自重、施工人员及设备荷载和倾倒混凝土冲击荷载等。其中,型钢主梁的最大应力为 145.3N/mm²,小于 Q235 钢的抗弯强度设计值 215N/mm²;立杆最大应力为 125.6N/mm²,小于钢管的抗压强度设计值 205N/mm²,各构件应力均在安全范围内。

4.2 不同施工阶段变形分析

支模架的变形与荷载变化同步,各施工阶段核心构件的最大变形值如下表所示:

施工阶段	立杆最大竖向变形 (mm)	水平杆最大水平变形 (mm)	型钢主梁最大挠度 (mm)
施工准备阶段	1.2	0.8	—
钢筋绑扎阶段	1.8	1.3	—
混凝土浇筑阶段	4.5	2.9	3.8
混凝土养护阶段	3.9	2.5	3.2

根据《建筑施工模板安全技术规范》(JGJ162-2008)要求,模板支架的允许变形值为 L/400 (L 为构件跨度)。对于本工程中最大跨度 2.5m 的悬挑支模架,允许最大变形值为 $2.5 \times 1000/400=6.25\text{mm}$ 。各施工阶段支模架的最大变形值均小于允许变形值,满足规范要求。在混凝土浇筑阶段,由于荷载最大,变形也达到最大,施工过程中需重点关注该阶段的变形情况,必要时采取加固措施。

4.3 稳定性分析

支模架的稳定性是施工安全的关键,采用欧拉公式结合《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ130-2011)中的稳定系数计算方法,考虑施工荷载动态变化,计算各阶段支模架的稳定系数,结果如下表所示:

施工阶段	立杆稳定系数	型钢支撑稳定系数	整体架体稳定系数
施工准备阶段	2.8	—	3.2
钢筋绑扎阶段	2.3	—	2.7
混凝土浇筑阶段	1.8	2.5	2.1
混凝土养护阶段	2.0	2.7	2.3

一般要求模板支架的稳定系数不小于 1.5,由上表可知,

各施工阶段支模架的稳定系数均满足要求。在混凝土浇筑阶段,稳定系数相对较小,这是因为该阶段荷载大且复杂,对架体稳定性影响较大。为保证支模架在该阶段的稳定,需严格按照施工方案设置剪刀撑、连墙件等,确保架体的整体稳定性。

5 结论与建议

5.1 结论

(1) 大跨度悬挑支模架在施工过程中,施工荷载呈现出明显的动态变化特征,混凝土浇筑阶段荷载最大且最为复杂,对支模架的力学性能影响最为显著。

(2) 通过时变力学分析可知,在考虑施工荷载动态变化的情况下,本工程大跨度悬挑支模架各构件在不同施工阶段的应力、变形均满足相关规范要求,稳定系数也符合规定,支模架设计合理可行。

(3) 型钢支撑在大跨度悬挑支模架中发挥了重要作用,能够有效承受和传递荷载,提高架体的承载能力和稳定性,适用于外挑长度较大的支模架体系。

5.2 建议

(1) 施工过程中,应根据不同施工阶段的荷载特点,对支模架进行动态监测,重点关注混凝土浇筑阶段的应力、变形及稳定性情况,一旦发现异常,及时采取措施进行处理。

(2) 严格按照施工方案进行支模架的搭设与拆除,确保立杆间距、步距、剪刀撑设置等符合要求,不得随意更改支模架的结构形式和参数。

(3) 对于采用型钢支撑的大跨度悬挑支模架,要加强对型钢焊接质量、膨胀螺栓锚固效果的检查,确保型钢支撑体系的可靠性。

(4) 后续类似工程在设计大跨度悬挑支模架时,应充分考虑施工荷载的动态变化,采用时变力学分析方法对支模架的力学性能进行全面评估,优化支模架设计方案,保障施工安全与结构质量。

参考文献:

- [1] 杨柳德. 高空大跨度悬挑结构模板支撑系统设计与施工[J]. 中国科技信息, 2009,(03):76-77+79.
- [2] 刘翔. 建筑物高空大跨度悬挑结构模板支撑施工技术应用[J]. 科学技术创新, 2023,(25):180-183.
- [3] 谢华伟. 高空悬挑支撑系统设计与施工技术应用[J]. 建筑技术开发, 2021,48(16):26-28.

[4] 顾勇军,王林国,徐斌. 高空大悬挑结构模板支撑架及装饰操作平台的设计与施工 [J]. 建筑安全,2018,33(07):23-26.

[5] 刘书豪,车向男,赵国录. 高空悬挑模板支撑系统应力分析及施工工艺 [C]// 中国模板脚手架协会;西安工业大学. 第一届全国模板脚手架学术交流大会论文集. 中国陕西省西安市,2019:169-172.

[6] 张晓晖. 大跨度钢筋混凝土悬挑结构模板支撑设计

与施工应用 [J/OL]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术,2024(10)[2024-10-01].

[7] 林榜. 高层建筑工程中悬挑高大模板支撑系统设计与施工 [J]. 中国建筑金属结构,2025,24(15):1-3.

作者简介: 欧瑞 (1993—), 男, 汉族, 湖北省钟祥市郢中镇, 全日制本科, 工程师, 研究方向为支模架中大跨度的悬挑支模架的研究和应用。