

高层建筑附着式升降脚手架安全可靠研究

苏伟明

(厦门市政工程有限公司,福建 厦门 361000)

摘要:为研究高层建筑施工中附着式升降脚手架的安全性能与结构可靠性,以厦门某安置房项目为工程背景,针对该工程的附着式升降脚手架体系开展了荷载计算、工况分析及安全验算。依据现行国家规范,采用理论计算与规范验算相结合的方法,分别对架体的恒荷载、施工活荷载与风荷载进行了精确计算,并选取使用、升降和台风 3 种典型施工工况进行构件受力分析与验算。结果表明:当架体最大跨度为 6.0 m、高度为 13.5 m 时,结构安全指标满足规范要求;螺杆、导向座及吊挂座等关键连接构件的抗拉、抗剪强度均符合设计要求,穿墙螺栓孔处混凝土局部受压强度验算安全裕度充分;同时防坠装置剪切应力低于材料抗剪强度限值,整体安全性能良好。本文研究成果可为同类型高层建筑施工中附着式升降脚手架设计、验算与安全保障提供技术支撑。

关键词:附着式升降脚手架;高层建筑施工;荷载计算;结构验算;安全性能

中图分类号:TU731.2;TU714

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)05-0068-06

doi:10.13402/j.gcjs.2026.05.056

Research on safety and reliability of attached lifting scaffold in high-rise buildings

SU Weiming

(Xiamen Municipal Engineering Co.,Ltd.,Xiamen 361000,Fujian,China)

Abstract: In order to study the safety performance and structural reliability of attached lifting scaffold in the construction of high-rise buildings, a resettlement housing project in Xiamen is taken as the project background; load calculation, working condition analysis and safety verification are carried out for the attached lifting scaffold system of the project. According to the current national standards, the dead load, construction live load and wind load of the frame are accurately calculated by combining theoretical calculation and code-based verification, and three typical construction conditions of service, lifting and typhoon are selected for component force analysis and verification. The results show that when the maximum span of the frame is 6.0 m and the height is 13.5 m, the structural safety index meets the requirements of the specification. The tensile and shear strength of key connecting components such as screws, guide seats, and hanging seats meet the design requirements. The local compressive strength of the concrete at the bolt holes penetrating the wall has been sufficiently checked for safety margins. Additionally, the shear stress of the anti-fall devices is below the material's shear strength limit, ensuring overall good safety performance. The research results can provide technical support for the design, calculation and safety assurance of attached lifting scaffold in the construction of the same type of high-rise buildings.

Key words: attached lifting scaffold; high-rise building construction; load calculation; structural verification; safety performance

收稿日期: 2025-08-05

作者简介: 苏伟明(1983—),男,高级工程师,从事土木工程、环境科学与工程和人工智能方面的研究。

随着我国城市化进程的不断加快,高层建筑建设数量日益增多,规模持续扩大。高层建筑施工过程中的安全性、经济性及效率日渐受到社会各界关注,尤其是在施工阶段如何采取有效可靠的高空作业防护措施,成为工程界研究的重要课题之一^[1]。传统的落地式脚手架不仅耗费大量人力、物力资源,而且在安全控制、施工进度和周转效率等方面存在明显不足;而附着式升降脚手架因其在安全性、操作便捷性、经济适用性等方面的显著优势,已逐步成为高层建筑施工中广泛采用的外墙防护体系^[2]。

近年来,国内学者对附着式升降脚手架开展了深入研究并取得了一系列代表性成果。例如,在结构安全性方面,王秀丽等^[3]对升降脚手架的支承体系、附着锚固构造和动力性能等进行了大量试验和理论分析,提出了相应的设计方法与验算公式;在实际应用层面,多个工程实例也验证了升降脚手架体系在提升施工效率、控制安全风险方面的有效性。国外学者侧重基于先进建模技术开展可靠性量化研究与复杂荷载作用下的响应分析,如 AL OMARI 等^[4]通过开发神经网络元模型,结合 30 000 个场景的有限元仿真分析,精准预测了风荷载与工人活动等动态荷载下的脚手架结构响应,为荷载量化分析与安全性能提升提供了高效解决方案,其模型决定系数达 0.999 6,大幅降低了传统仿真的时间成本;FRISHTER 等^[5]采用理论-数值-实验相结合的复合研究方法,针对多层工业脚手架开展风荷载影响研究,系统分析了边界设计差异下结构的局部应力应变状态,揭示了风荷载作用下脚手架关键部位的受力特性与响应规律。然而,现有研究大多偏重于理论分析和单一施工阶段的静态验算,对于动态荷载作用下多施工工况的安全性分析和验算应用研究仍显不足,特别是在强风载和高跨度架体的安全性评价方面仍需进一步完善^[6]。

针对上述研究不足,本文结合厦门某高层安置房项目的实际情况,以全钢附着式升降脚手架体系为研究对象,采用理论计算与有限元仿真分析相结合的方法,重点分析不同工况下架体的安全性和稳定性,尤其关注架体在复杂风载作用下

的受力特性^[7]。通过全面系统地计算分析,提出适合本工程特点的架体优化设计及施工安全保障措施,以期同类工程提供科学有效的技术参考与实践指导。

1 工程概况

项目位于厦门市集美区,项目性质为安置房建设,总用地面积为 16 662 m²,总建筑面积为 87 135 m²,其中地上建筑面积为 59 635 m²,地下建筑面积为 27 500 m²。规划地块内共计建设 9 幢楼,主要包括安置房住宅楼、物业管理用房和商业配套用房等。其中 1[#]、3[#]、5[#]、7[#]、9[#]楼为 30 层剪力墙结构,2[#]、4[#]、6[#]、8[#]楼为 1 层框架结构,整体建筑结构体系明确,结构形式具有代表性。依据工程地质及气象资料,项目抗震设防烈度为 7 度,50 a 一遇基本风压为 0.8 kN/m²,地面粗糙度等级为 B 类。

项目高层住宅楼的外墙施工采用全钢附着式升降脚手架,架体高度为 13.5 m,最大支承跨度为 6.0 m,经验算其架体全高与支承跨度的乘积为 81.0 m²,满足国家规范规定的安全控制指标(<110 m²)。架体于建筑物第 2 层(标高为 5.7 m)开始组装,至屋面层(标高为 91.5 m)具备同步升降功能并承担外墙安全防护任务。为保障施工安全和拆模效率,升降脚手架采用密目冲孔钢板网进行封闭防护,脚手板采用满铺方式,并在架体内合理设置 7 层走道板,步距依次为 2.0、2.0、2.0、2.0、2.0、1.9 m(步距取板厚中心距),架体顶部另留 1.55 m 防护高度,有效保障施工过程中的安全与便捷性。项目现场升降脚手架安装完成后的情况如图 1 所示。



图 1 升降脚手架安装完成实景

2 计算分析

为确保项目中附着式升降脚手架在施工期间

的安全性及可靠性,针对不同施工条件进行详细的荷载计算与构件强度验算。具体针对使用工况、升降工况及台风工况进行分析,并对螺杆受拉、受剪强度、螺栓连接处混凝土的局部受压强度、导向座及吊挂座的结构强度进行全面验算,以明确施工安全技术控制要点。

2.1 荷载计算

2.1.1 恒荷载

项目附着式升降脚手架的恒荷载包含提升系统自重与架体自重两部分:提升系统自重为 100 kg,按重力加速度 10 N/kg 换算得 1 000 N;架体自重按 6.0 m 跨度、4 500 N/m 的单位重量(含导轨)计算,得 27 000 N。经合计得,脚手架的恒荷载总重为 28 000 N。

2.1.2 活荷载

不同施工状态下,脚手架的施工活荷载标准值存在差异:三步架同时作业、二步架同时作业及升降状态下的活荷载标准值,分别取 2.0、3.0、0.5 kN/m²。

2.1.3 风荷载

工程位于厦门市,风荷载取值按 B 类地貌条件确定,基本风压计算结合风速系数(1.0)、高度修正系数(2.25)及体型系数修正系数(5.0)确定。

(1) 基本风压计算。依据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012),基本风压计算公式为

$$w_0 = v^2 / 1\,600 \quad (1)$$

式中: w_0 为基本风压, kN/m²; v 为风速, m/s。

风况分类与参数: 5 级风对应风速为 10 m/s,代入公式得基本风压为 0.072 kN/m²(即 72 N/m²); 10 a 一遇风压取 0.5 kN/m²; 50 a 一遇风压取 0.8 kN/m²。

(2) 挡风系数与体型系数计算。依据《建筑施工工具式脚手架安全技术规范》(JGJ 202—2010),采用密目钢板冲孔网时,挡风系数 φ 与体型系数 μ_s 计算流程如下。

迎风面积参数: 总迎风面积 A_w 为 3 615 000 mm²(对应尺寸为 2 250 mm × 2 410 mm); 网片挡风面积 S_1 为 1 168 308 mm²、网框挡风面积 S_2 为 257 960 mm²,总挡风面积 $A_N = S_1 + S_2 = 1\,426\,268$ mm²。

根据 JGJ 202—2010 第 4.2.3 条,密目钢板网

挡风系数取 1.2 倍净挡风面积比; 体型系数取 1.3 倍挡风系数。挡风系数计算公式:

$$\varphi = 1.2 \times A_N / A_w \quad (2)$$

代入数据得挡风系数约为 0.47。

体型系数计算公式:

$$\mu_s = 1.3 \times \varphi \quad (3)$$

代入数据得体型系数为 0.611。

(3) 风荷载标准值计算。风荷载标准值计算公式:

$$w_k = 0.7 \mu_z \mu_s w_0 \quad (4)$$

式中: w_k 为风荷载标准值, kN/m²; μ_z 为风压高度变化系数; μ_s 为脚手架风荷载体型系数。

不同风况计算结果: 5 级风风荷载为 99 N/m²; 10 a 一遇风荷载为 688 N/m²; 50 a 一遇风荷载为 1 100 N/m²。

2.2 荷载组合及内力分析

依据 JGJ 202—2010,荷载分项系数中恒载系数 γ_a 取 1.3,活载系数 γ_q 取 1.5(使用工况 γ_b 下取 1.3、升降及坠落工况 γ_c 下取 2.0); 不同工况的设计荷载需通过荷载组合确定,计算单元上下弦杆内力设计值如下。

使用工况(荷载组合系数 1.3): $P_{\text{设}} = 1.3 \times 28\,000 + 1.5 \times 21\,600 = 68\,800$ N。

升降工况(荷载组合系数 1.2): $P_{\text{升}} = 2.0 \times 28\,000 + 1.5 \times 3\,600 = 61\,400$ N。

台风工况(静荷载组合系数 2.0): $P_{\text{台}} = 2 \times 28\,000 = 56\,000$ N。

3 施工工况验算及应用

3.1 使用工况验算

以 10 a 一遇风荷载作用为例,架体顶部导座风荷载计算流程: $F_{\text{风}1} = 2 \times 0.7 \times 1.5 \times 688 \times 5.95 \times 6.0 = 21\,010$ N。

中间导座风荷载: $F_{\text{风}2} = 2 \times 0.9 \times 1.5 \times 688 \times 3.0 \times 6.0 = 33\,437$ N。

顶部导座单根螺杆拉力: $N_t = \frac{21\,010}{2} = 10\,505$ N。

中间导座单根螺杆剪力及拉力分别为

剪力: $N_v = 41\,280/2 = 20\,640$ N。

拉力: $N_t = 44\,445/2 = 22\,223$ N。

通过验算，螺杆抗拉强度为 59.1 N/mm²、抗剪强度为 36.8 N/mm²，满足 M30 螺栓 5.6 级设计强度要求。

3.2 混凝土局部受压强度验算

根据《混凝土结构设计规范(2015 年版)》(GB 50010—2010)，穿墙螺栓孔处混凝土局部受压承载力公式：

$$N_v \leq 1.35 \beta_b \beta_l f_c b d \tag{5}$$

式中： N_v 为一个螺栓所承受的剪力设计值，N； β_b 为螺栓孔混凝土受荷计算系数，取 0.39； β_l 为混凝土局部承压强度提高系数，取 1.73； f_c 为上升时混凝土龄期试块轴心抗压强度设计值，N/mm²； b 为混凝土外墙厚度，mm； d 为穿墙螺栓直径，mm。

代入相关系数得：剪力值 $N_v = 20\,640\text{ N}$ 远小于混凝土承压极限 63 394.9 N，安全裕度充足。

3.3 升降及坠落工况相关构件验算

为确保附着式升降脚手架在升降及可能坠落工况下的安全性，项目对防坠落装置、附墙吊挂座、穿墙螺杆等的抗剪、抗拉强度进行严格校核，以论证结构安全性能。

3.3.1 防坠落装置构件验算

防坠落装置采用 SUS304 不锈钢(抗拉强度为 520 N/mm²，抗剪强度为 312 N/mm²)，核心构件剪应力计算结果如表 1 所示。

此外，葫芦链条最小破断拉力 125 000 N 远超设计荷载 61 400 N，强度满足规范要求。

3.3.2 附墙吊挂座强度验算

附墙吊挂座作为升降工况核心传力构件，采用 Q235B 碳素结构钢满焊成型，构造兼顾受力合理性与稳定性：左右侧板为 10 mm 厚钢板(300 mm × 150 mm)，中间通过 6 mm 厚加强肋板(280 mm × 80 mm)纵向拉结，背面采用 6 mm 厚连接板与 10 mm 厚背板加强板(320 mm × 180 mm)形成立体加固体系，可分散剪切与拉伸荷载、避免局部应

力集中。

依据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)第 3.4.1 条，Q235B 钢抗剪强度设计值为 125 N/mm²、抗拉强度设计值为 215 N/mm²；8.8 级 m²4 高强度螺栓(连接部件)抗剪强度设计值为 250 N/mm²，为验算核心依据。

验算荷载取升降工况结果：螺栓总剪力为 55.46 kN，由两个 M24 螺栓均匀分担(单栓为 27.73 kN)，左右侧板同步承受单栓剪力(27.73 kN/块)。侧板受剪截面参数：螺栓孔径为 25 mm(预留 1 mm 间隙)，受剪高度为 120 mm(孔中心至下边缘)，净截面剪应力约为 25.8 N/mm² 远小于 Q235B 抗剪强度设计值，且剪应力储备系数满足 JGJ 202—2010 第 5.3.2 条“临时受力构件安全系数不低于 1.5”要求。螺栓连接验算：单栓剪应力约为 78.6 N/mm²，小于 250 N/mm²，节点可靠。中间加强肋板与背板可分散附加应力(实测未超过 20 N/mm²)，综合验证表明构件强度满足规范。

3.3.3 附墙吊挂座提升销轴强度验算

销轴选用 Q235 钢，直径 d 为 27 mm，两侧同时受剪，有效剪切截面：

$$A_{销轴} = 2 \times \frac{\pi \times d^2}{4} \tag{6}$$

计算得，有效剪切截面为 1 144 mm²。

剪应力： $\tau = \frac{61\,400}{1\,144} = 53.7\text{ N/mm}^2$ 。

Q235 钢抗剪强度允许值为 145 N/mm²，计算剪应力远低于限值，强度满足要求。

3.3.4 附墙吊挂座穿墙螺杆验算

采用双 M30、5.6 级螺栓(有效截面积 A_s 为 561 mm²)，升降工况下，螺杆承受最大剪力 N_v 为 61 400 N，拉力 N_s 为 27 730 N。

抗剪强度： $f_v = \frac{N_v}{A_s} = \frac{61\,400}{561} = 109.5\text{ N/mm}^2 < 190\text{ N/mm}^2$ 。

表 1 核心构件剪应力计算结果

构件	剪切截面积/mm ²	剪应力/(N·mm ⁻²)	结论
防坠滑块	8.2 × 45 = 369.0	61 400/369 ≈ 166.4	远小于限值,安全储备充分
防坠链轮	10 × 50 = 500.0	61 400/500 ≈ 122.8	远小于限值,安全储备充分
防坠轴	π × 202/4 ≈ 314.2	61 400/314.2 ≈ 195.4	小于限值,安全储备充足

$$\text{抗拉强度: } f_t = \frac{N_s}{A_s} = \frac{27\,730}{561} = 49.5 \text{ N/mm}^2 <$$

210 N/mm²。

强度验算结果均低于材料设计值, 螺杆选型合理, 安全储备充分。

3.4 台风工况相关验算

(1) 内力计算: 台风来临时停止施工, 架体受力为静载 + 50 a 一遇风荷载。风荷载标准值计算按式(4)计算得, $F_{\text{风}} = 2 \times 1.5 \times 0.9 \times 1\,100 \times 5.95 \times 6.0 = 106\,029 \text{ N}$ 。

机位螺栓内力分配如下。

剪力: $N_1 = 5.95/13.5 \times P_{\text{台}} = 5.95/13.5 \times 56\,000 = 24\,682 \text{ N}$ ($P_{\text{台}}$ 为机位总竖向荷载, N)。

拉力: $N_s = N_1 (L + a/2)/H + F_{\text{风}} = 24\,682 \times (0.5 + 0.6/2)/3.0 + 106\,029 = 112\,611 \text{ N}$ (L 为螺栓间距, mm; a 为荷载作用点距螺栓群中心距离, mm; H 为竖向力作用高度, mm)。

双螺杆设置时, 单根螺杆受力:

剪力 $N_v = N_1/2 = 12\,341 \text{ N}$ 。

拉力 $N_t = N_s/2 = 56\,306 \text{ N}$ 。

(2) 混凝土强度与局部承压验算: C30 混凝土轴心抗压强度设计值 $f_c = 14.3 \text{ N/mm}^2$, 浇筑后至提升间歇约为 15 d, 故取 $f_{c,15d} = f_c \times \lg 15 / \lg 28 = 11.6 \text{ N/mm}^2$ ($f_{c,15d}$ 为 15 d 龄期混凝土轴心抗压强度, N/mm²)。

局部承压承载力计算 (承压面为 200 mm × 30 mm) 按式(5)计算得, $N_c = 1.35 \times 0.39 \times 1.73 \times 11.6 \times 200 \times 30 = 63\,394.9 \text{ N}$ 。

压力 $N_v = 56\,306 \text{ N} < 63\,394.812 \text{ N}$, 满足混凝土局部承压要求。

(3) 单个附着螺栓验算: 根据 GB 50017—2017 表 4.4.5 (M30 螺栓), 查得: 螺栓抗剪强度设计值 $f_v^b = 190 \text{ N/mm}^2$, 抗拉强度设计值 $f_t^b = 210 \text{ N/mm}^2$ 。结合 JGJ 202—2010, 计算公式如下。

单个抗剪螺栓的受剪承载力设计值 N_v^b 公式:

$$N_v^b = \frac{\pi d^2}{4} f_v^b \quad (7)$$

代入数据计算: $N_v^b = \frac{3.14 \times 30^2}{4} \times 190 =$

134 235 > 12 341 N。

抗剪承载力满足要求。

单个抗拉螺栓的受拉承载力设计值 N_t^b 公式:

$$N_t^b = \frac{\pi d_0^2}{4} f_t^b = A_e f_t^b \quad (8)$$

代入数据计算: $N_t^b = 561 \times 210 = 117\,810 > 56\,306 \text{ N}$ 。

抗拉承载力满足要求。

(4) 螺栓复合受力验算。按螺栓复合受力公式验证, 需满足:

$$\sqrt{\left(\frac{N_v}{N_v^b}\right)^2 + \left(\frac{N_t}{N_t^b}\right)^2} \leq 1 \quad (9)$$

式中: N_v 取 12 341 N; N_v^b 为螺栓抗剪承载力设计值, N, 取 134 235 N; N_t 取 56 306 N; N_t^b 为螺栓抗拉承载力设计值, N, 取 117 810 N。

代入数值计算:

$$\sqrt{\left(\frac{12\,341}{134\,235}\right)^2 + \left(\frac{56\,306}{117\,810}\right)^2} = \sqrt{0.01 + 0.23} =$$

0.49 < 1。

单一强度验算如下。

抗拉强度: $f = \frac{N_t}{A_s} = \frac{56\,306}{561} \approx 100.4 \text{ N/mm}^2 <$

210 N/mm², 抗剪强度: $f = \frac{N_v}{A_s} = \frac{12\,341}{561} \approx 21.9 \text{ N/mm}^2 < 190 \text{ N/mm}^2$, 均满足要求。

经复合受力及单一强度验算, 螺栓力学性能满足要求。

综上, 台风作用下需保留下层半架体, 并在顶部预埋临时拉结点, 确保整体稳定性与安全性。

3.5 升降动力设备选型

葫芦提升拉力设计值公式:

$$T_E = \gamma_0 \gamma_6 \left(\sum N_{Gik} + \sum N_{Qik} \right) \quad (10)$$

式中: T_E 为架体升降时的提升荷载设计值, kN; γ_0 为结构重要性系数, 取 1.1; γ_6 为升降荷载不均匀系数, 取 2.0; $\sum N_{Gik}$ 为第 i 个提升点处永久荷载标准值之和, kN, 本次取 25.721 kN; $\sum N_{Qik}$ 为第 i 个提升点处可变荷载标准值之和, kN, 本次取 4.68 kN。

经计算, T_E 为 66.9 kN, 换算为吨力约为 6.69 t。

产品采用电动葫芦额定工作拉力为 7.5 t, 大于 6.69 t, 满足设计要求。

4 结 论

(1) 通过严格的荷载计算与分析,项目升降脚手架架体在使用、升降和台风工况下的恒荷载、活荷载与风荷载取值合理,组合荷载的确定满足国家规范要求。经内力分析与构件强度验算,架体支承螺杆、附墙导向座、吊挂座等关键构件的抗拉、抗剪强度均满足工程安全要求,结构整体稳定性及安全性良好,可作为同类工程的参考依据。

(2) 计算结果表明,架体最大跨度为 6.0 m、全高 13.5 m 时,其高度与跨度乘积(81.0 m^2)远小于规范限值(110 m^2),架体设计具有较高安全冗余。此外,采用密目钢板冲孔网的挡风系数合理可靠,实际风载体型系数经详细计算取 0.611,验证了钢板冲孔网在减小架体风荷载方面的有效性。

(3) 验算结果表明:使用工况下螺杆最大拉力为 33 159 N、最大剪力为 20 640 N;升降工况下最大剪力为 61 400 N、最大拉力为 25 917 N,构件所受应力均远低于螺栓材料设计强度。同时,穿墙螺栓孔混凝土局部受压强度验算满足规范要求,混凝土承压安全裕度充足,结构安全性得到有效保障。

(4) 经对防坠落装置详细分析,防坠滑块、防坠链轮及防坠轴等构件在坠落工况下剪应力显著低于材料抗剪强度设计值,系统整体安全可靠。

此次研究为高层建筑附着式升降脚手架的安全设计与施工提供了可靠理论与实践支撑,但仍有优化空间:后续需补充地震及偶然荷载下的安

全性能研究,开展关键构件疲劳效应与长期服役性能分析;结合有限元仿真与参数化设计技术优化架体结构,引入物联网传感技术构建智能监测预警体系,探索轻量化、模块化、绿色化装配应用,以完善安全评价与设计体系,更好地指导工程实践。

参考文献:

- [1] 张晓通,赵涛. 基于实例的附着式升降脚手架中桁架结构优化布置的有限元分析[J]. 工程建设,2024,56(6):21-26.
- [2] 刘亚雄,黄瑞,王天鑫,等. 铝合金附着式升降脚手架承力构件刚性及稳定性[J]. 机械设计与研究,2023,39(5):207-209.
- [3] 王秀丽,崔健,赵涛. 附着式升降脚手架新型钢结构附着节点应用研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(2):273-281.
- [4] AL OMARI M,ESLAHI M,EL MEOUCHE R,et al. El Meouche. Et Al. Neural network-based metamodel for scaffolding behavior: Application for structural load analysis and safety enhancement[J]. Applications in Engineering Science,2025,23:100240.
- [5] FRISHTER L, LUKIN M. Experimental study of wind impact on multilevel industrial scaffolding[J]. E3S Web of Conferences,2020,157:06009.
- [6] 苏伟明. 市政给排水大口径长距离钢管顶管施工设计与应用研究[J]. 工程建设,2025,57(11):81-87.
- [7] 潘为民,孔宁宁,李国华,等. 附着式整体升降脚手架的风荷载研究[J]. 机械设计与制造,2018(9):33-35.