

风荷载作用下超高层建筑脚手架立杆 稳定性研究

贾世龙¹, 陈凯荟^{1,2}, 刘莉¹, 陈忠良³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 天友建筑设计股份有限公司结构设计部, 天津 300384;
3. 沈阳万科企业有限公司工程部, 辽宁 沈阳 110166)

摘要 目的 研究风荷载对超高层建筑脚手架稳定性的影响, 完善结构设计理论。

方法 通过数理分析, 优化风荷载计算公式, 并以实际工程算例进行校核; 计算、分析风荷载对不同支设基准面(距地面高度大于100 m)、不同搭设方式超高层建筑脚手架立杆附加轴力的影响幅度及变化规律。**结果** 笔者提出简化的风荷载计算方法与现行规范相比, 超高层风荷载附加轴力对脚手架立杆轴力增幅影响超过10%。**结论** 与普通脚手架设计相比, 超高层建筑脚手架设计应进一步考虑高空风荷载附加轴力的影响, 加强构造措施, 以保证架体稳定性。

关键词 风荷载; 风振系数; 附加轴力; 稳定性; 立杆轴力设计值

中图分类号 TU731.2

文献标志码 A

Study on Stability of Scaffolding Poles for Super High-rise Buildings under Wind Loads

JIA Shilong¹, CHEN Kaihui^{1,2}, LIU Li¹, CHEN Zhongliang³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Structure Design Department, Tenio Architectural Design Co. Ltd., Tianjin, China, 300384; 3. Engineering Department, Shenyang Vanke Enterprise Co. Ltd., Shenyang, China, 110166)

Abstract: The purpose of this paper is to study the influence of wind loads on the stability of scaffolding poles for super high-rise building and improve the theory of structural design. According to calculation and analysis, the computing formula of wind loads is improved and also checked in compliance with the engineering practical example. The influence of wind loads above 100m in the air on the axial stress of scaffolding standing pole varies with the ground clearance of the scaffolding base level and scaffolding erection scheme. The authors calculate and analyze the variation range and the variation law. The authors improve the computing methods of wind loads.

收稿日期: 2021-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978422); 辽宁省重大科技专项基金项目(2019JH2/10300054); 辽宁省自然科学基金项目(201602617); 辽宁省教育厅科研项目(LNJC201905)

作者简介: 贾世龙(1976—), 男, 副教授, 主要从事结构安全和施工管理等方面研究。

Compared with the current standard, the effect of additional axial stress caused by the wind loads on the increase of axial stress on the scaffolding standing pole for super high-rise building exceeds 10%. Compared with normal scaffolding erection scheme, scaffolding erection scheme of super high-rise building must consider additional axial stress caused by the wind loads above 100 m in the air into account. In order to guarantee stability of the scaffold, measures of reinforcing the structure are needed.

Key words: wind load; wind fluttering factor; additional axial stress; stability; design value of axial stress on the standing pole

作业平台、承重支撑架体系等临时结构直接影响超高层建筑的施工安全。K. Ohdo等^[1]调查发现约10%的脚手架事故是由风引发的。对于不同工况下,支设基准面高度在100 m级以上的脚手架,架体的水平位移远远大于竖向位移,架体稳定性主要取决于风荷载^[2]。因此,研究风荷载对超高层建筑脚手架的稳定性影响具有重要的工程意义。

国内外大量研究者针对风荷载对超高层建筑脚手架的稳定性影响进行了研究。S. Charuvisi等^[3]研究了不同体型脚手架的风压特性,揭示架体宽度对风压系数的影响、建筑物开口形式对风压值的影响;S. Huang等^[4], A. Giannoulis等^[5], S. D. Amoroso等^[6]利用CFD法和风洞试验得到了整体提升架体的风荷载,提出覆盖安全网脚手架的风压计算方法。H. Irtaza等^[7-8]通过全尺寸的脚手架模型风洞试验,指出英美等国技术标准中的风载压力系数适用于脚手架迎风面,背风面仅做参考;秦桂娟等^[9]通过现场试验和有限元分析,明确不同搭设基准高度风荷载对脚手架立杆最大弯矩值的影响,指出某些情况下现行规范中计算公式安全储备不足,建议进一步计算风荷载引起的超高层脚手架立杆的最大弯矩;王朝晖等^[10]建议对规范中立杆计算长度系数进行调整。

目前,高空风振对临时结构稳定性影响效应定量分析的相关研究仍较为缺乏,现行规范也未提出相关的设计依据。基于此,笔者以超高层建筑脚手架为研究对象,基于风振理论,对高空风荷载对脚手架立杆稳定性

的影响进行数值模拟研究,探究支设基准面高度、搭设方式对脚手架立杆附加轴力的影响幅度及变化规律,并优化风荷载计算公式,简化风荷载计算方法,为同类工程设计提供参考。

1 高空风荷载的确定

目前,依据我国现行规范^[11-12]在100 m以内的建筑及临时结构设计中,将风荷载视为低空静力荷载,弱化风振影响,简化风振系数为1.0。风荷载按照式(1)计算:

$$w_k = \mu_s \cdot \mu_z \cdot w_0 \quad (1)$$

式中: w_k 、 w_0 分别为风压标准值及风荷载基本风压值, kN/m^2 ; μ_s 为风荷载体形系数值; μ_z 为风压高度变化值。

1.1 高空风荷载的特性

不同于近地风,高空风随时间的变化更为随机和频繁,其特性受到平均风特性和脉动风特性的共同影响。高空风荷载对建筑结构的影响,除了高度对平均风速的增加外,由脉动风产生的动力荷载作用效果进一步显现。

脉动风特性表现:高度越低,湍流强度越大;湍流积分尺度越大,湍流影响越显著;顺向湍流的影响效果远高于垂直向湍流和横向湍流^[13-15]。

1.2 高空风荷载的计算与简化

在超高层建筑脚手架(支设基准面与地面高差大于100 m的各种脚手架)的结构抗风研究中,应充分考虑高空风荷载作用。

笔者采用等效风振力法,以顺向湍流影响

为主,将脉冲风作用简化为风振系数,并叠加平均风压^[16],计算超高层脚手架风荷载,将动力学问题转化为任意时刻的静力问题。根据静力学原理,产生该响应的荷载可表示为

$$P_{eq}(t) = \sum_j \omega_j^2 \mathbf{M} \phi_j q_j(t). \quad (2)$$

式中: $P_{eq}(t)$ 为等效风振力,包含气动力以及风振引起的惯性力、阻尼力在内的一种等效力; ω_j 为等效风振力均方根; \mathbf{M} 为结构质量分布阵; ϕ_j 为结构各阶振型。

高层及超高层建筑振动均以一阶振型为主,等效静力法采用平均值与结构一阶等效风振力组合出等效静力风荷载。因此,超高层脚手架计算风荷载时需考虑风振系数,将脉冲风与平均风组合,根据规范^[17],按照式(3)计算风荷载:

$$w_k = \beta_z \cdot \mu_z \cdot \mu_s \cdot w_0. \quad (3)$$

风振系数按照式(4)计算:

$$\beta_z = 1 + 2gI_{10}B_z \sqrt{1+R^2}. \quad (4)$$

式中: g 为峰值因子,取2.5; I_{10} 为10 m高处湍流强度; B_z 为脉动风荷载共振分量因子; R 为脉动风荷载背景分量因子。

脉动风荷载共振分量因子 B_z 按照式(5)进行计算:

$$B_z = kH^{\alpha_1} \rho_x \rho_z \varphi_1(z) / \mu_z. \quad (5)$$

式中: ρ_x 为水平向脉动风荷载相关系数,取1; ρ_z 为竖向相关系数,可按 $\rho_z = 10 \sqrt{H+60}e^{-H/60} - 60/H$ 计算(H 为支设基准面高度,对应四类地面取值分别不超过300 m、350 m、450 m和550 m); $\varphi_1(z)$ 为结构第一阶振型系数,可根据规范^[17]取值; k 、 α_1 根据规范^[17]针对四类地面可取定值。

脉动风荷载背景分量因子 R 按照式(6)进行计算:

$$R = \sqrt{\frac{\pi}{6\xi_1} \frac{x_1^2}{(1+x_1^2)^{\frac{4}{3}}}}. \quad (6)$$

$$x_1 = \frac{30f_1}{\sqrt{k_w w_0}}, x_1 > 5. \quad (7)$$

式中: f_1 为结构第一阶自振频率,Hz; k_w 为

地面粗糙度修正系数,对应四类地面分别取1.28、1.0、0.54、0.26; ξ_1 为结构阻尼比,钢结构取值0.02,混凝土结构取值为0.05,笔者取值0.02。

参照高耸建筑第一阶自振频率, f_1 按照式(8)计算:

$$f_1 = \frac{1}{T} = \frac{1}{(0.007 \sim 0.013)H}. \quad (8)$$

对钢筋混凝土结构可取0.007,钢结构可取0.013,笔者取0.013。

综上,将各式代入式(3)中,即可得到基于简化风振法算法,水平风荷载及竖向风荷载共同作用下四类地面高空风荷载标准值,与规范算法比较,其计算误差在7%以内。

2 风荷载附加轴力对架体稳定性的影响

对于普通脚手架设计,现行规范^[12]未考虑高空风荷载对立杆轴力的影响。超高层脚手架,风荷载对立杆会进一步产生附加轴力,安装在外立杆的安全网、挡脚板、防护栏杆等配件有利于迎风面架体稳定。因此,笔者以背风面为对象,研究风荷载附加轴力值,按式(9)计算超高层脚手架立杆轴力值:

$$N = \gamma_G \times (\sum N_{G1k} + \sum N_{G2k}) + \gamma_Q \times (\sum N_{Qk} + \sum N_{Qkf}) \times 0.9. \quad (9)$$

式中: γ_G 、 γ_Q 分别为永久荷载、可变荷载分项系数,根据《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB50068—2018)分别取1.3和1.5; N_{G1k} 、 N_{G2k} 、 N_{Qk} 分别为脚手架的结构自重、构配件结构、施工荷载产生的轴力设计标准值。0.9为荷载组合值系数; N_{Qkf} 为风荷载附加轴力标准值。

2.1 有限元模型选择

脚手架采用扣件式钢管脚手架,脚手管为 $\Phi 48.3 \times 3.6$ 的Q235级钢,钢管间的连接为半刚性连接。建模过程中架体立杆及纵横

向水平杆选择 Beam188 单元,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$,剪刀撑选择 Link180 单元,采用 Combin14 弹簧单元模拟脚手架节点的半刚性连接。根据规范^[17],将弹簧的转动刚度取值为 $35 (\text{kN} \cdot \text{m})/\text{rad}$ 。利用有限元 ANSYS 软件建立步距 1.8 m,跨距 1.5 m,横距 1.05 m 的脚手架有限元模型,连墙件采用两步两跨菱形布置形式。有限元模型图如图 1 所示。

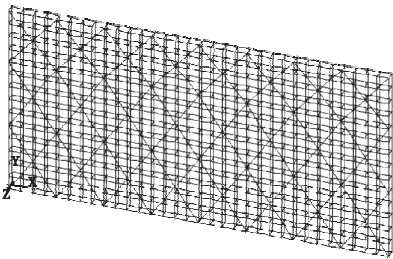


图 1 有限元模型图

Fig. 1 Finite element model

设置考虑风荷载和未考虑风荷载两种加载方式,脚手架所在高度为 150 m 处有限元荷载情况及计算结果如图 2、图 3 所示。

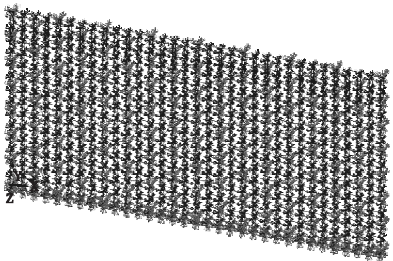


图 2 未考虑风荷载模型图

Fig. 2 Model diagram without wind load

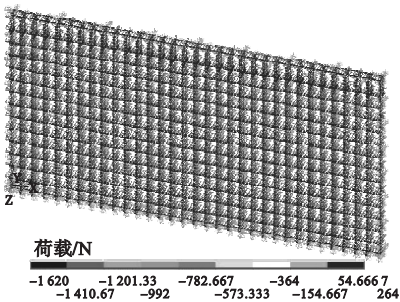


图 3 考虑风荷载模型图

Fig. 3 Model diagram with wind loads

两种加载方式有限元分析结果如图 4、图 5 所示。

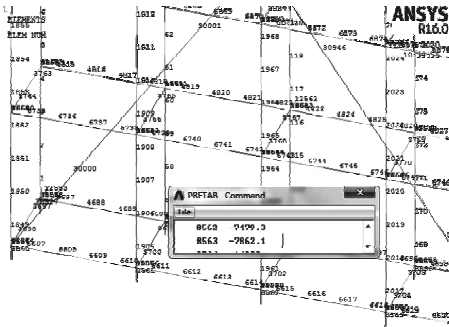


图 4 未考虑风荷载结果分析

Fig. 4 No analysis of wind load results

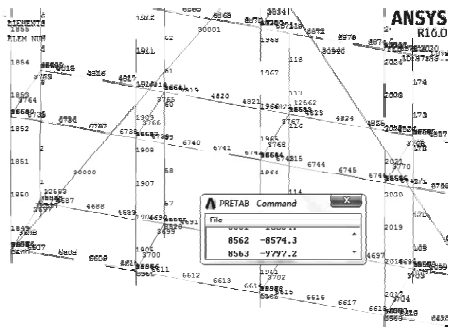


图 5 风荷载产生附加轴力值分析图

Fig. 5 Wind load produces additional axial force analysis

根据有限元分析结果发现,在施工荷载和风荷载共同作用下,架体底部立杆最大轴力值出现在靠近架体边缘外立杆,单元号为 8 563 的位置处。由于风荷载的作用,架体底部立杆最大轴力值由 $-7\ 862 \text{ N}$ 增大到 $-9\ 797 \text{ N}$,风荷载对底部立杆产生的附加轴力值大小为 $1\ 935 \text{ N}$,按照如下方法计算立杆轴力设计值,与规范计算值进行对比分析。

依据规范法,单立杆轴向力设计值,应按照以下公式计算得:

$$N = 1.3(N_{G1k} + N_{G2k}) + 1.5 \sum N_{Qk} = 1.3 \times (3.95 + 4.37) + 1.5 \times 2.7 = 14.87 \text{ kN}。$$

考虑风荷载附加轴力值,单立杆轴向力设计值计算如下:

$$N = 1.3 \times (\sum N_{G1k} + \sum N_{G2k}) + 1.5 \times (\sum N_{Qk} + \sum N_{Qkf}) \times 0.9 = 1.3 \times (3.95 + 4.37) + 1.5 \times (2.7 + 1.94) \times 0.9 = 17.07 \text{ kN}。$$

与普通脚手架立杆轴力相比较,组合风荷载附加轴力后,立杆轴力设计值增加近

15%,为进一步探究风荷载对轴力设计值的影响,笔者将针对不同搭设方案及不同高度处的超高层脚手架展开进一步研究。

2.2 不同纵距下附加轴力对架体稳定性的影响

为便于进行数据对比,依据规范^[12],笔者构建 l_a 分别为1 m、1.2 m、1.5 m、1.6 m, l_b 为1.05 m, h 为1.8 m的四种架体有限元模型(为增加架体平面刚度,连墙件采取两跨两步布置),分析搭设基准面高度为150 m的架体内力,结果如图6~图9所示。

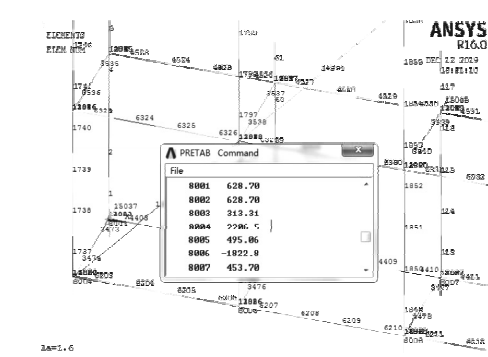


图9 $l_a = 1.6$ m有限元分析结果

Fig. 9 Analysis of finite element results($l_a = 1.6$ m)

脚手架立杆纵距不同时,不同高度处附加轴力值及立杆轴力值与脚手架规范对比情况如表1~表4及图10、图11所示。

表1 底部立杆轴力设计值对比($l_a = 1$ m)

Table 1 Bottom pole axial force design value comparison($l_a = 1$ m)

H/m	附加轴力值/N	规范中风荷载立杆轴力设计值/N	组合附加轴力立杆轴力设计值/N	立杆轴力设计值增大比例/%
150	1 066	11 618	12 787	10.06
200	1 081	11 618	12 806	10.23
250	1 096	11 618	12 828	10.41
300	1 112	11 618	12 849	10.60
350	1 126	11 618	12 868	10.76
400	1 140	11 618	12 887	10.92
450	1 154	11 618	12 906	11.09

表2 底部立杆轴力设计值对比($l_a = 1.2$ m)

Table 2 Bottom pole axial force design value comparison($l_a = 1.2$ m)

H/m	附加轴力值/N	规范中风荷载立杆轴力设计值/N	组合附加轴力立杆轴力设计值/N	立杆轴力设计值增大比例/%
150	1 448	12 915	14 546	12.63
200	1 488	12 915	14 600	13.05
250	1 528	12 915	14 654	13.46
300	1 569	12 915	14 709	13.89
350	1 597	12 915	14 747	14.19
400	1 625	12 915	14 785	14.48
450	1 651	12 915	14 825	14.79

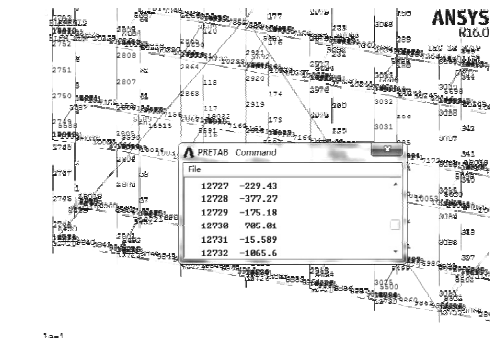


图6 $l_a = 1$ m有限元分析结果

Fig. 6 Analysis of finite element results($l_a = 1$ m)

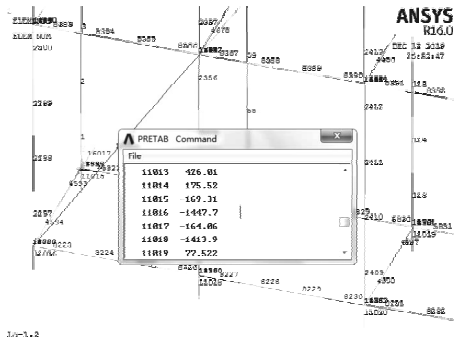


图7 $l_a = 1.2$ m有限元分析结果

Fig. 7 Analysis of finite element results($l_a = 1.2$ m)

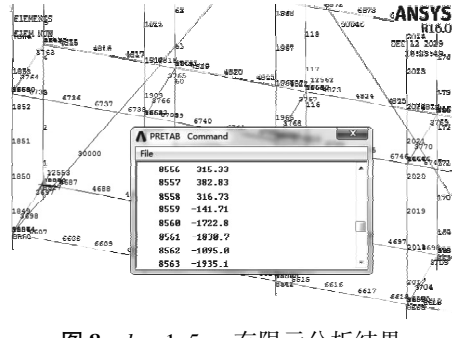


图8 $l_a = 1.5$ m有限元分析结果

Fig. 8 Analysis of finite element results($l_a = 1.5$ m)

表 3 底部立杆轴力设计值对比($l_a = 1.5\text{ m}$)

Table 3 Bottom pole axial force design value comparison($l_a = 1.5\text{ m}$)				
H/m	附加轴 力值/N	规范中风荷	组合附加轴	立杆轴力
		载立杆轴力 设计值/N	力立杆轴力 设计值/N	设计值增大 比例/%
150	1 935	14 870	17 068	14.78
200	1 999	14 870	17 155	15.37
250	2 056	14 870	17 232	15.88
300	2 127	14 870	17 327	16.52
350	2 166	14 870	17 380	16.88
400	2 195	14 870	17 419	17.14
450	2 250	14 870	17 494	17.65

表 4 底部立杆轴力设计值对比($l_a = 1.6\text{ m}$)

Table 4 Bottom pole axial force design value comparison($l_a = 1.6\text{ m}$)				
H/m	附加轴 力值/N	规范中风荷	组合附加轴	立杆轴力
		载立杆轴力 设计值/N	力立杆轴力 设计值/N	设计值增大 比例/%
150	2 207	15 510	18 056	16.42
200	2 282	15 510	18 158	17.07
250	2 353	15 510	18 254	17.69
300	2 431	15 510	18 359	18.37
350	2 472	15 510	18 414	18.72
400	2 514	15 510	18 471	19.09
450	2 559	15 510	18 532	19.48

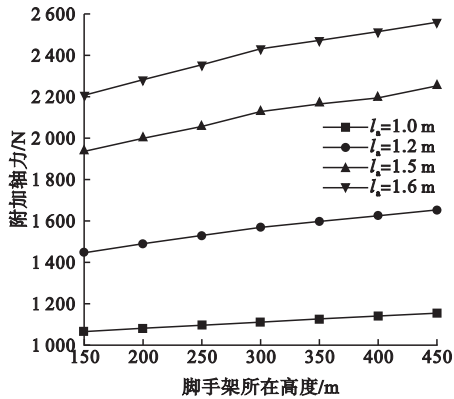


图 10 不同纵距下附加轴力随搭设基准高度变化

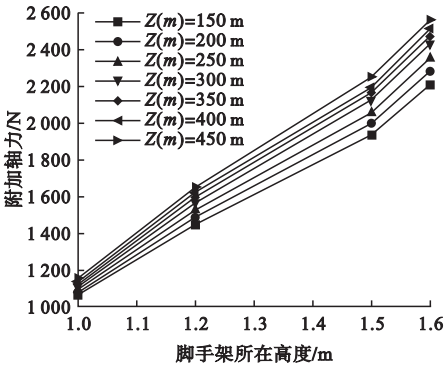


图 11 不同高度附加轴力随纵距变化

Fig. 11 Variation of additional axial force at different heights with longitudinal distance

不同立杆纵距时,脚手架底部立杆最大轴力值均出现在靠近边缘的外立杆处,将有限元分析结果进行汇总,由表 1 ~ 表 4 及图 10 可知,附加轴力值随架体支设基准面的增加而增加,附加轴力随纵距变化基本呈线性变化,每隔 50 m 附加轴力变化幅度随立杆纵距的增加而增加,立杆纵距为 1.6 m 时增加约 1.95%,立杆纵距为 1 m 时增大约 1.33%。

由表 1 ~ 表 4 及图 11 可知,相同支设基准面,附加轴力随立杆纵距增加而增加,但增长幅度有所不同,立杆纵距为 1.5 ~ 1.6 m 时的增加幅度最大,纵距每增加 0.1 m 附加轴力增长 14.19%;纵距为 1.2 ~ 1.5 m 时附加轴力增加幅度小于 1.0 ~ 1.2 m 时的增加幅度,附加轴力随支设基准面为非线性变化。

与普通脚手架计算方法相对比,考虑附加轴力后,超高层脚手架立杆轴力均有所增加。其增大幅度随脚手架所在高度及纵距的增加而增加,立杆纵距为 1.6 m 时增大百分数为 19.48%,立杆纵距为 1 m 时最小增大百分数为 10.06%。

2.3 不同横距下附加轴力对架体稳定性的影响

依据规范^[12],笔者构建了 l_b 分别为 1 m、1.2 m、1.5 m、1.6 m, l_a 为 1.5 m, h 为 1.8 m 的 4 种架体有限元模型(连墙件采取

Fig. 10 Variation of additional axial force with erection reference height at different longitudinal distances

两跨两步布置),分析搭设基准面高度为150 m的架体内力,计算结构如图12~图15所示。

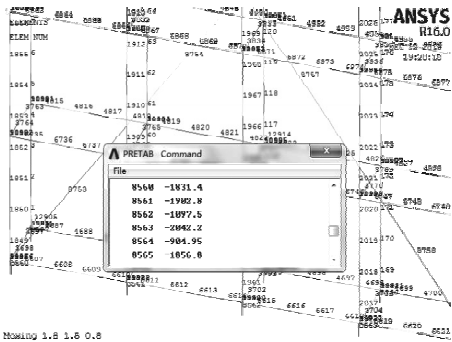


图12 $l_b=0.8\text{ m}$ 有限元分析结果

Fig.12 Analysis of finite element results($l_b=0.8\text{ m}$)

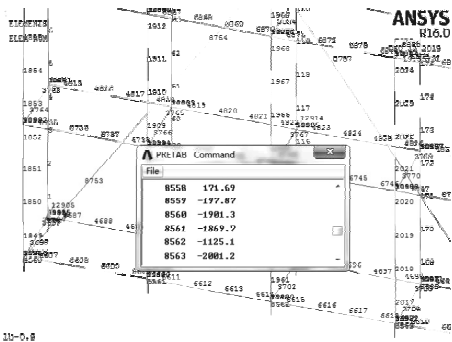


图13 $l_b=0.9\text{ m}$ 有限元分析结果

Fig.13 Analysis of finite element results($l_b=0.9\text{ m}$)

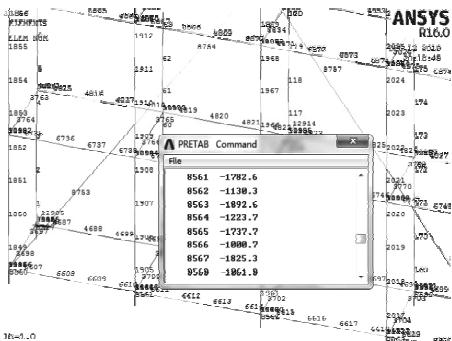


图14 $l_b=1.0\text{ m}$ 有限元分析结果

Fig.14 Analysis of finite element results($l_b=1.0\text{ m}$)

底部立杆最大附加轴力值均出现在边跨处内立杆,单元号为8563的位置。架体所在不同高度处附加轴力值、立杆轴力设计值变化情况汇总如表5~表8,及图16、图17所示。

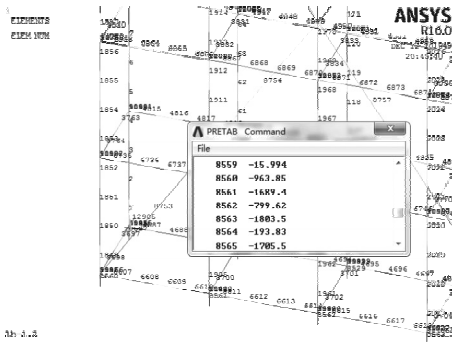


图15 $l_b=1.2\text{ m}$ 有限元分析结果

Fig.15 Analysis of finite element results($l_b=1.2\text{ m}$)

表5 底部立杆轴力设计值对比($l_b=0.8\text{ m}$)

Table 5 Bottom pole axial force design value comparison($l_b=0.8\text{ m}$)

H/m	附加轴力值/N	规范中风荷	组合附加轴	立杆轴力
		载立杆轴力设计值/N	力立杆轴力设计值/N	设计值增大比例/%
150	2 042	13 347	15 683	17.50
200	2 120	13 347	15 788	18.29
250	2 196	13 347	15 891	19.06
300	2 255	13 347	15 971	19.66
350	2 296	13 347	16 026	20.07
400	2 338	13 347	16 083	20.50
450	2 383	13 347	16 143	20.95

表6 底部立杆轴力设计值对比($l_b=0.9\text{ m}$)

Table 6 Bottom pole axial force design value comparison table($l_b=0.9\text{ m}$)

H/m	附加轴力值/N	规范中风荷	组合附加轴	立杆轴力
		载立杆轴力设计值/N	力立杆轴力设计值/N	设计值增大比例/%
150	1 929	13 888	16 137	16.19
200	2 001	13 888	16 234	16.90
250	2 060	13 888	16 314	17.47
300	2 123	13 888	16 399	18.08
350	2 161	13 888	16 450	18.45
400	2 200	13 888	16 503	18.83
450	2 241	13 888	16 558	19.23

将有限元分析结果进行汇总,由表5~表8及图16可知:立杆横距为1.2 m时,附加轴力随脚手架所在高度的变化非线性比较明显;立杆轴力为0.8 m、0.9 m、1 m时附加轴力基本随支设基准面变化基本呈线性变

表 7 底部立杆轴力设计值对比($l_b = 1.0\text{ m}$)

Table 7 Bottom pole axial force design value comparison($l_b = 1.0\text{ m}$)				
H/m	附加轴 力值/ N	规范中风荷 载立杆轴力 设计值/ N	组合附加轴 力立杆轴力 设计值/ N	立杆轴力 设计值增大 比例/%
150	1 893	14 533	16 699	14. 91
200	1 948	14 533	16 774	15. 42
250	2 002	14 533	16 847	15. 92
300	2 060	14 533	16 925	16. 46
350	2 107	14 533	16 988	16. 89
400	2 143	14 533	17 037	17. 23
450	2 193	14 533	17 104	17. 69

表 8 底部立杆轴力设计值对比表($l_b = 1.2\text{ m}$)

Table 8 Bottom pole axial force design value comparison table($l_b = 1.2\text{ m}$)				
H/m	附加轴 力值/ N	规范中风荷 载立杆轴力 设计值/ N	组合附加轴 力立杆轴力 设计值/ N	立杆轴力 设计值增大 比例/%
150	1 803	15 863	17 786	12. 12
200	1 829	15 863	17 849	12. 52
250	1 876	15 863	17 913	12. 92
300	1 926	15 863	17 980	13. 35
350	1 945	15 863	18 006	13. 51
400	1 970	15 863	18 039	13. 72
450	1 997	15 863	18 076	13. 95

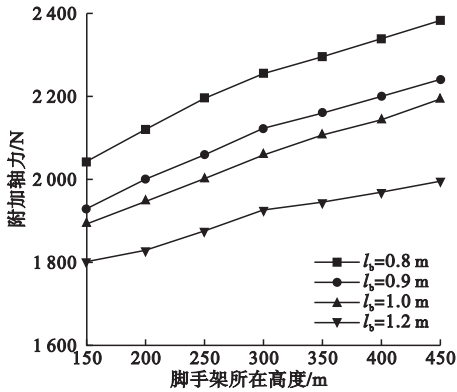


图 16 不同横距下附加轴力随搭设基准高度变化

Fig. 16 Variation of additional axial force at different lateral distances with the erection reference height

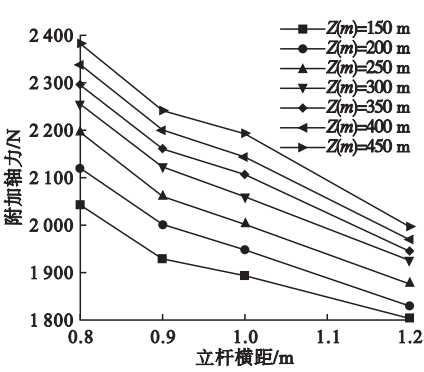


图 17 不同高度附加轴力随横距变化

Fig. 17 Variation of additional axial force at different heights with lateral distance

化,每隔 50 m 附加轴力变化幅度随立杆横距的增加而降低,立杆横距为 0.8 m 时增加百分数约为 2.76%,立杆纵距为 1.2 m 时增大百分数约为 1.92%。

由表 5 ~ 表 8 及图 17 可知,相同支设基准面,附加轴力随立杆横距增加而降低,但变化幅度呈现非线性,立杆横距为 0.8 ~ 0.9 m 时的变化幅度最大,横距每增加 0.1 m 附加轴力降低 5.83%;横距为 0.9 ~ 1 m 时附加轴力变化幅度小于 1.0 ~ 1.2 m 时的变化幅度。高空风荷载对立杆的附加轴力立杆横距为 0.8 m 时最大增大百分数为 20.95%,立杆横距为 1.2 m 时最小增大百分数为 12.12%。

综上所述,对超高层脚手架而言,风荷载对脚手架立杆轴力的影响是显著的。附加轴力值与支设基准面高度呈正相关,随基准面高度的增加而增加;附加轴力值与立杆横距呈负相关,随横距的增加而减小。不同构造的架体,立杆附加轴力至少增加 10%,故建议计算超高层脚手架轴力设计值时将风荷载附加轴力值组合到计算公式当中。

3 结 论

(1)通过有限元计算分析,风荷载会对超高层建筑脚手架立杆产生附加轴力,其大小随支设基准面的升高而增大;当支设基准面高度超过 150 m 时,作用效果尤为明显;相

同支设基准面,附加力增长幅度随立杆纵距的增加而增加;随立杆横距的增加而降低,其增值幅度均表现出非线性规律;对于不同搭设方式,立杆附加轴力值增幅在10%以上。

(2)采用风振系数的等效计算,提出了四类地面粗糙度风荷载简化计算公式和风荷载附加轴力计算公式,均以沈阳地区10年重现期的基本风压为依据;而对于东南沿海、西北高原地区,应进一步以实测数据做校核。

(3)对超高层建筑脚手架,高空风荷载不仅仅增加了立杆轴力,其风压变化所产生的水平弯矩将进一步增加脚手架(尤其是超高层悬挑式脚手架)的挠度变形;在实际工程设计中,应充分考虑脉动风作用,加强构造措施,以保证架体安全性、稳定性、可靠性。

参考文献

- [1] OHDO K, AKANASHI S, HINO Y. Measurement of wind load acting on the scaffolds [J]. Specific research reports of the national institute of industrial safety, 2005, 31 (2): 181 - 183.
- [2] 张毅,袁勇.超高层建筑附着式升降脚手架的计算分析[J].建筑施工,2000(6):36-37. (ZHANG Yi, YUAN Yong. Calculation analysis of attached lifting scaffold for super high-rise building [J]. Building construction, 2000(6): 36 - 37.)
- [3] CHARUVISIT S, HINO Y, OHDO K, et al. Wind tunnel experiment on wind pressures acting on the scaffolds in strong winds [J]. Journal of wind engineering, 2007(32): 1 - 10.
- [4] HUANG S, LI Q S, XU S. Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD [J]. Journal of wind engineering and industrial aero-dynamics, 2007, 63(4): 448 - 459.
- [5] GIANNOULIS A, MISTRIOTIS A, BRIASSOULIS D. Experimental and numerical investigation of the airflow around a raised permeable panel [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2010(98): 808 - 817.
- [6] AMOROSO S D, LEVITAN M L. Wind loads for high solidity open-frame structures [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2011, 14(1): 1 - 14.
- [7] Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-8; General-Design of joints: EN-1993-1-8 [S]. European Committee for Standardization, 2000.
- [8] IRTAZA H, BEALE R G, GODLEY M H R. A wind-tunnel investigation into the pressure distribution around sheet-clad scaffolds [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2012(103): 86 - 95.
- [9] 秦桂娟,任嘉智.超高层脚手架连墙件风载作用分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(2): 306 - 312. (QIN Guijuan, REN Jiazhi. Analysis of wind load on super high-rise scaffolding with wall parts [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31 (2): 306 - 312.)
- [10] 王朝辉,曹阳,段奕飞,等.风荷载及连墙件对扣件式双排钢管脚手架承载能力的影响研究[J].施工技术,2014,43(20):118-121. (WANG Chaohui, CAO Yang, DUAN Yifei, et al. Study on the influence of wind load and tie member to the bearing capacity of double pole steel tubular coupling scaffold [J]. Construction technology, 2014, 43 (20): 118 - 121.)
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑施工脚手架安全技术统一标准:GB 51210—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016. (The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Unified standard for safety of scaffold in construction: GB51210—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范:JGJ130—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011. (The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for safety of steel tubular scaffold with couplers in construction: JGJ130—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [13] 李锦状.超高层建筑临时支撑结构风压及风致反应的研究[D].北京:北京交通大学,2018. (LI Jinzhuang. Study on wind pressure and wind-induced response of temporary support structure of super high-rise buildings [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.)
- [14] 毛璐璐,韩兆龙,周岱,等.典型形体超高层建筑的风压风场与抗风优化研究[J].振动与冲击,2019,38(18):215-222. (MAO Lulu, HAN Zhaolong, ZHOU Dai, et al. Wind pressure and wind-resistant shape optimization of typical super high-rise buildings [J]. Journal of vibration and shock, 2019, 38 (18): 215 - 222.)
- [15] ARISTODEMOU E. How tall buildings affect turbulent air flows and dispersion of pollution within a neighbourhood [J]. Environmental pollution, 2018, 233: 782 - 796.
- [16] 严亚林.基于风洞试验的高层建筑动力荷载影响相关法研究[D].北京:中国建筑科学研究院,2016. (YAN Yalin. Research on correlation method of dynamic load response of high-rise building based on wind tunnel test [D]. Beijing: China Academy of Building Sciences, 2016.)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012. (The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:刘永军)