

文章编号:1005-0523(2015)02-0103-06

某高层建筑风荷载体型系数数值模拟分析

吴华英¹,李婷¹,江涛¹,黄宏²

(1.江西杭萧钢构有限公司,江西 南昌 330013;2.华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:采用标准 k - ε 湍流模型,对南昌“云中城”项目中高层建筑进行了风荷载数值模拟分析,得出了两座办公塔楼表面各测点间的风压值。通过计算导出了两座塔楼的风荷载体型系数的最大绝对值,并与规范中单体建筑物的风荷载体型系数进行了比较,得出,群体产生的湍流效应对建筑物的风荷载体型系数影响不可忽视,同时还受建筑间距的影响。

关键词:高层建筑;风荷载;体型系数;数值模拟

中图分类号:TU973+.14

文献标志码:A

随着我国经济的快速发展及人口数量的增加,各地高层建筑物愈来愈多,当高层建筑群的间距较近时,由于漩涡的相互干扰,建筑物局部风压会显著增大。现行的《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)(以下简称《荷规》)只给出了较为规则建筑物的风载体型系数,而对于体型复杂的建筑物以及建筑群,应进行风洞试验或者数值模拟以确定其风载体型系数^[1]。与风洞试验相比,采用数值模拟分析进行抗风研究具有耗时间少,模型的形状和尺寸不受限制,成本经济等优点。

目前已有学者对群体建筑物风荷载影响进行了数值模拟研究,杨伟^[2]对两栋方形高层建筑模型在串列、并列和偏置状态下的静态三维流场和风荷载进行了计算。沈祺^[3]对上海市某住宅小区风场进行了三维数值模拟研究,讨论了街区群楼间间距及建筑布局等因素改变时对风场和风荷载的影响。张敏^[4]对由4栋高层建筑组成的建筑群风荷载和风场进行了数值模拟研究。郑朝荣^[5]对某发电厂景观烟囱的风载体型系数进行了数值模拟计算。曲文超^[6]对两个相邻建筑物风荷载干扰效应的静、动力风荷载进行了数值模拟分析。吴剑锋^[7]对正方形平面封闭式房屋的风荷载体型系数进行了数值模拟计算。赵鹏转^[8]对通信塔风压体型系数进行了模拟计算。

1 工程概况

南昌“云中城”项目位于南昌市高新区艾溪湖大桥东,地块西临艾溪湖、南临紫阳大道。该项目包括2栋51层223.5 m高的塔楼、1栋3层23.75 m高的裙楼和1栋2层13.45 m高的商业建筑。其中2栋塔楼总建筑面积318 738 m²(包括地上、地下),地上总建筑面积216 293 m²,地下3层(局部4层)主要为车库和设备用房。裙楼总建筑面积8 321 m²,商业建筑总建筑面积1 556 m²,项目效果图如图1。2栋塔楼地下4层为型钢混凝土框架-混凝土核心筒结构体系,地上结构采用钢管混凝土柱^[9]+钢梁框架-混凝土核心筒结构体系。

项目中2栋塔楼高度为223.5 m,为超高层建筑。该类建筑结构对风荷载的作用极为敏感,且2座塔楼

收稿日期:2014-00-00

基金项目:国家自然科学基金项目(51378206,51008122);江西省青年科学家培养对象(20133BCB23015);江西省青年科学基金项目(20143ACB21020)

作者简介:吴华英(1977—),男,浙江杭州人,高级工程师,工学硕士,主要研究方向为钢结构设计。



图1 项目效果图

Fig.1 The project renderings

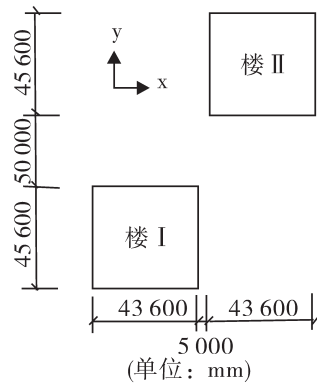


图2 办公楼平面布置图

Fig.2 Plane layout of the project

的间距仅 50 m。预计流经这个垂直方向狭窄通风道的气流有别于简单塔状建筑物的周围气流,双塔间流涡的相互干扰效应将使建筑物的某些部位局部风压显著增大,群体效应对建筑物和建筑物之间的通道也会造成危害。为保证办公塔楼结构和幕墙设计的安全、经济、合理,同时按照国家建筑结构荷载规范的建议,有必要对其结构表面风压和体型系数进行测定。综合多方面因素考虑,将采用数值模拟方法对办公塔楼的表面风压进行分析研究。

在上述学者的研究基础上,以下将采用软件 FLUENT14.0 对项目建筑物风荷载作用进行数值模拟分析。

2 数值模拟

项目中建筑物风荷载数值模拟的主要技术参数为:根据《荷规》,50年一遇的基本风压为 $0.45 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,项目所在地的地面粗糙度为B类,地貌粗糙指数 $\alpha=0.16$ 。计算时在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 范围内每隔 30° 取一个风向角,共有12个风向角工况,风向角如图3。

2.1 模型建立

采用 ICFM CFD14.0 作为前处理软件,塔楼和裙楼按原型尺寸建立几何模型,可以避免尺寸效应对计算结果产生的影响,同时考虑周围建筑物对风场的影响。模拟中采用的流域大小(长 \times 宽 \times 高)为 $3\ 600 \text{ m}\times 2\ 500 \text{ m}\times 800 \text{ m}$,在长度方向模型置于流场 $1/3$ 处,阻塞率小于2%。由于分析结构较为复杂,模型计算区域采用非结构的四面体网格划分方法,在靠近办公塔楼表面采用加密的网格形式。网格尺寸由内向外逐渐增大,在靠近建筑物表面区域,使用过渡的棱柱体网络(6层),整个流域总的网格数约为430万个,网格示意图如图4、图5。

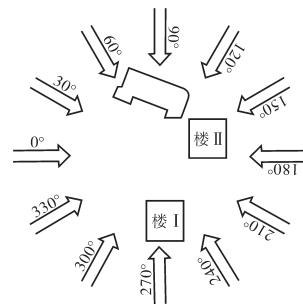


图3 风向角示意图

Fig.3 The wind azimuths

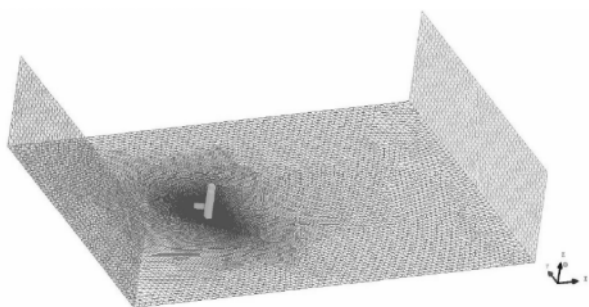


图4 0°整体网格示意图

Fig.4 The whole mesh scheme of 0°

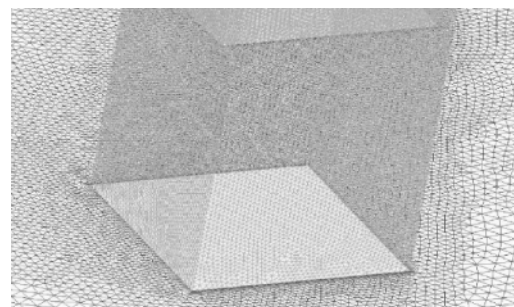


图5 办公塔楼局部网格示意图

Fig.5 Local mesh scheme of building

模拟中采用 CFD 常用的标准 $k-\epsilon$ 湍流模型配合非平衡壁面函数法进行模拟计算,该方法可以较为精确

的模拟钝体绕流问题。因可实现的k-ε湍流模型一般只适用于湍流的核心区域,而在近壁面,湍流流动受到显著影响,故模型采用非平衡壁面函数法来处理近壁面的湍流状态。

标准k-ε湍流模型控制方程为^[10]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中, $G_k = \nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 是由于平均速度梯度引起的湍动能k的产生项; G_b 是由于浮力引起的湍动能k的产生项,对于不可压缩流体 $G_b=0$; Y_M 为可压湍流中脉动扩张的贡献,对于不可压缩流体 $Y_M=0$; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 分别为湍流动能k和湍流耗散率ε对应的Prandtl数,模拟中各常数取值为: $C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_{3\varepsilon}=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$; S_k 和 S_ε 是自定义源项。

非平衡壁面函数法对黏性底层不进行求解,而是使用半经验公式计算k、ε和切向速度,将其和完全发展的湍流区域联系起来,进而求解出整个流域。

模型计算的边界条件与文献[4]中的相同。

2.2 测点布置

为了得出办公塔楼表面各点在不同方向风荷载作用下的风压,在模拟过程中两塔楼共布置120个测点,测点的具体布置情况如图6。测点的命名由塔楼号、高度号和点号共同确定,如IA1表示塔楼I,A高度处(即标高为50 m)1位置处的点。同时,为了后面求解平均风压,对结构的各面进行了命名,分别为F1~F4。

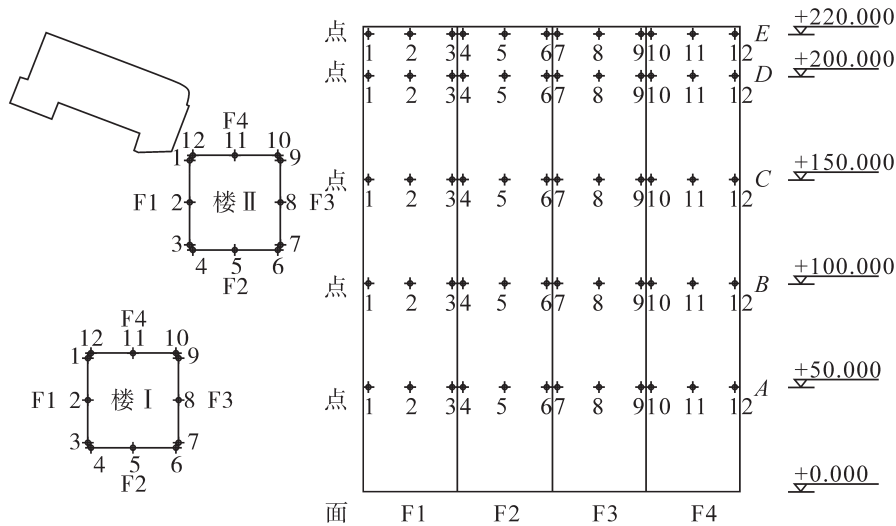


图6 测点布置图

Fig. 6 Layout of pressure points

2.3 各测点风压

采用上述方法进行模拟计算得出各测点的风压值。在抗风设计中,若考虑当地主导风向,此时必须兼顾各风向角下的最大风压值。由于各风向角下平均风压的最大正、负值起着控制作用,故表1和表2分别给出了塔楼I和塔楼II在12个风向角下各测点出现的平均风压最大正、负值(风压值单位为kN·m⁻²)。表1和表2中风压的最大正值为负时,表示该测点在任何风向角下都只出现负风压;风压的最大负值为正时,表示该测点在任何风向角下都只出现正风压,此值为绝对值最小正风压。围护结构设计时,可采用表1和

表2中的风压值通过式(4)和式(5)可以得出个测点对应的局部体型系数。

表1 塔楼 I 各测点风压的最大正、负值

Tab.1 The maximum positive and negative pressure of Building I

楼 I 测点	A		B		C		D		E	
	最大 正值	最大 负值	最大 正值	最大 负值	最大 正值	最大 负值	最大 正值	最大 负值	最大 正值	最大 负值
1	0.52	-1.27	0.47	-1.51	0.51	-1.33	0.49	-1.26	0.35	-1.27
2	1.36	-1.19	1.55	-1.32	1.70	-1.04	1.69	-1.24	1.18	-1.17
3	1.24	-1.58	1.32	-1.54	1.37	-1.48	1.52	-1.50	1.52	-1.35
4	1.04	-1.12	1.13	-1.23	1.22	-1.35	1.24	-1.51	1.22	-1.58
5	1.52	-1.62	1.69	-1.18	1.83	-1.48	1.88	-1.32	0.36	-1.33
6	0.90	-1.82	1.08	-1.63	1.21	-1.60	1.20	-1.87	-0.01	-1.34
7	0.50	-0.93	0.68	-0.92	0.85	-1.05	0.88	-1.04	0.64	-1.19
8	1.30	-0.93	1.51	-0.90	1.64	-1.03	1.62	-1.03	1.30	-1.09
9	1.23	-1.22	1.12	-1.23	1.41	-1.29	1.28	-1.18	1.32	-1.24
10	0.41	-1.70	0.41	-1.62	0.41	-1.34	0.48	-1.40	0.59	-1.57
11	1.23	-1.28	1.43	-1.29	1.53	-1.22	1.66	-1.30	1.47	-1.33
12	0.23	-1.34	1.30	-1.79	1.34	-1.53	1.44	-1.31	1.51	-1.31

表2 塔楼 II 各测点风压的最大正、负值

Tab.2 The maximum positive and negative pressure of Building II

楼 II 测点	A		B		C		D		E	
	最大 正值	最大 负值	最大 正值	最大 负值	最大 正值	最大 负值	最大 正值	最大 负值	最大 正值	最大 负值
1	0.50	-0.93	0.68	-0.92	0.85	-1.05	0.88	-1.04	0.64	-1.19
2	1.30	-0.93	1.51	-0.90	1.64	-1.03	1.62	-1.03	1.30	-1.09
3	1.23	-1.22	1.12	-1.23	1.41	-1.29	1.28	-1.18	1.32	-1.24
4	0.41	-1.70	0.41	-1.62	0.41	-1.34	0.48	-1.40	0.59	-1.57
5	1.23	-1.28	1.43	-1.29	1.53	-1.22	1.66	-1.30	1.47	-1.33
6	0.23	-1.34	1.30	-1.79	1.34	-1.53	1.44	-1.31	1.51	-1.31
7	0.52	-1.27	0.47	-1.51	0.51	-1.33	0.49	-1.26	0.35	-1.27
8	1.36	-1.19	1.55	-1.32	1.70	-1.04	1.69	-1.24	1.18	-1.17
9	1.24	-1.58	1.32	-1.54	1.37	-1.48	1.52	-1.50	1.52	-1.35
10	1.04	-1.12	1.13	-1.23	1.22	-1.35	1.24	-1.51	1.22	-1.58
11	1.52	-1.62	1.69	-1.18	1.83	-1.48	1.88	-1.32	0.36	-1.33
12	0.90	-1.82	1.08	-1.63	1.21	-1.60	1.20	-1.87	0	-1.34

2.4 结构体型系数计算

塔楼各立面的平均体型系数可以通过式(3)、式(4)和式(5)的计算得出。

$$\bar{\mu}_s = \frac{\sum \mu_{si} A_n}{\sum A_n} \quad (3)$$

$$\mu_{si} = \left(\frac{z_r}{z_i} \right)^{2\alpha} C_{pi} \quad (4)$$

$$C_{pi} = \frac{P_i}{0.5\rho V_r^2} \quad (5)$$

式中: $\bar{\mu}_s$ 为各面在各个风向角下的平均体型系数;将塔楼结构分为 0~50 m, 50~100 m, 100~150 m, 150~200 m, 200~220 m 这 5 个区段, A_n 即为各区段的面积; m_{si} 为各测点对应的局部体型系数; $z_i=223.5$ m, $z_r=10$ m; C_{pi} 为建筑物表面某测点 i 的风压系数; P_i 是测点 i 的风压值; r 为空气密度, 其值为 $1.25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; V_r 是参考点的风速, 南昌地区 50 年一遇的基本风压为 $0.45 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, 相当于离地面 10 m 高度处 10 分钟的平均最大风速为 $26.83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 故参考点 223.5 m 处的风速 $V_i=44.11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

为了解结构各面体型系数的变化, 将各测点的高度和模拟计算所得的风压值 P_i , 结合式(3)、式(4)和式(5)得出各个风向角下的各面平均体型系数, 如表 3 所示。由于结构的分析结果基本对称, 故下文结果均只给出 $0^\circ\sim 150^\circ$ 范围内的 6 个结果, $180^\circ\sim 330^\circ$ 范围内的结果可以参考对应的角度结果得到。

表 3 各面平均体型系数

Tab.3 The average shape coefficient of each facade

办公塔楼	立面	0°	30°	60°	90°	120°	150°
I	F1	0.64	0.23	-0.58	0.09	0.13	-0.03
	F2	-0.95	-0.97	-0.84	0.01	0.11	-0.08
	F3	-0.94	-0.95	-0.93	-0.14	-0.04	1.25
	F4	-0.97	-0.06	0.37	1.12	0.02	0.00
II	F1	0.60	0.37	-0.06	-0.04	-0.03	0.01
	F2	-1.02	-1.37	-1.20	0.10	-0.05	-0.13
	F3	-0.89	-1.29	-1.13	0.02	-0.04	1.31
	F4	-0.97	-1.10	0.24	1.47	1.28	0.63

结合以上各面平均体型系数, 利用式(6)、式(7)可得塔楼整体体型系数, 结构整体体型系数可以用于承重结构设计。

$$\mu_{sx} = \mu_{F1} - \mu_{F3} \quad (6)$$

$$\mu_{sy} = \mu_{F2} - \mu_{F4} \quad (7)$$

其中 μ_{Fi} 为 F_i 面的体型系数, x 轴和 y 轴由图 2 确定。由于两办公塔楼具有较大的对称性, 所以在塔楼结构设计中结构 x 和 y 方向体型系数绝对值的最大值是主要关心的参数。表 4 中给出了 $0^\circ\sim 150^\circ$ 范围内结构 x 和 y 方向体型系数绝对值的最大值。从表 4 可以看出, 对于 x 方向, 0° 和 30° 较为不利; 对于 y 方向, 60° 和 90° 较为不利; 塔楼 I 和 II 结构的风荷载体型系数最大绝对值分别为 1.58 和 1.66, 为塔楼的抗侧力结构、围护构件的风荷载设计提供了参考依据。由《荷规》可知, 本项目中塔楼 I、II 作为单体建筑时的风荷载体型系数最大绝对值均为 1.4, 与表 4 中最大绝对值对比可知, 建筑间距对建筑的风荷载体型系数影响较大。

表 4 结构 x 方向和 y 方向体型系数绝对值

Tab.4 Shape coefficient absolute value of the structure X direction and Y direction

办公塔楼	方向	0°	30°	60°	90°	120°	150°	最大绝对值	
								最大值	风向角
I	μ_{sx}	1.58	1.18	0.35	0.23	0.17	1.28	1.58	0°
	μ_{sy}	0.02	0.91	1.21	1.38	0.09	0.08	1.38	90°
II	μ_{sx}	1.49	1.66	1.07	0.06	0.01	1.30	1.66	30°
	μ_{sy}	0.05	0.27	1.44	1.37	1.33	0.76	1.44	60°

3 结论

通过上述分析, 可以得出如下结论:

1) 模型中采用标准 k - ε 湍流模型配合非平衡壁面函数法对塔楼 I 和 II 结构风荷载进行计算, 可以较为精确的模拟钝体绕流问题;

2) 塔楼 I 和 II 结构风荷载体型系数最大绝对值出现在以下风向角: 0° 和 30° (x 方向), 以及 60° 和 90° (y 方向), 数值模拟得出的塔楼 I 和 II 结构的风荷载体型系数为塔楼的抗侧力结构、围护构件的风荷载设计提供了参考依据;

3) 高层建筑群由于群楼产生的湍流效应对高层建筑结构的风荷载体型系数影响不可忽视, 同时还受到建筑物间距的影响。

参考文献:

- [1] 《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)[S]. 中华人民共和国国家标准, 2012.
- [2] 杨伟, 黄鹏, 顾明. 高层建筑风致静力干扰效应的试验和数值研究[J]. 同济大学学报, 2004,32(2):152-156.
- [3] 沈祺, 王国砚, 顾明. 多幢高层建筑物间风场数值模拟和风灾分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2008,36(5):592-597.
- [4] 张敏, 楼文娟, 何鸽俊, 等. 群体高层建筑风荷载干扰效应的数值研究[J]. 工程力学, 2008,25(1):179-185.
- [5] 郑朝荣, 张文元, 张耀春, 等. 某发电厂景观烟囱的风载体型系数研究[J]. 工业建筑, 2008,38(S):259-263.
- [6] 曲文超. 高层建筑结构风荷载数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [7] 吴剑锋, 王彩华, 张文福. 湍流模型对建筑物风荷载体型系数数值模拟的影响[J]. 科学技术与工程, 2011,11(6):1368-1370.
- [8] 赵鹏转, 王国砚. 基于数值模拟的某通信塔风荷载体型系数研究[J]. 结构工程师, 2012,28(1):82-86.
- [9] 黄宏, 杨超, 张安哥, 等. 圆钢管混凝土不等偏压柱的有限元计算[J]. 华东交通大学学报, 2009,26(6):11-15.
- [10] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

Numerical Simulation and Analysis on Wind Load Shape Coefficient of High-rise Building

Wu Huaying¹, Li Ting¹, Jiang Tao¹, Huang Hong²

(1. Jiangxi Hang Xiao Steel Structure Co. Ltd., Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East of China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: According to the standard $k-\varepsilon$ turbulence model, this study carried out numerical simulation and analysis of wind load on the high-rise buildings of Cloud City Project in Nanchang and found out the wind pressure value at measure points of the two office building surface. Then it obtained the maximum absolute value of wind load shape coefficient of two buildings through calculating and compared it with that of single building in relevant specifications. Finally, it draws a conclusion that the turbulence effects resulting from community on wind load shape coefficient of buildings can not be neglected. Meanwhile it also maintains that wind load model coefficient is also influenced by the building interval.

Key words: high-rise buildings; wind load; shape coefficient; numerical simulation

(责任编辑 王建华)