

复杂体型高层建筑风洞试验及数值模拟

李正良¹, 王承启¹, 赵仕兴², 魏奇科¹, 刘红军¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 四川省建筑设计院, 成都 610017)

摘要:以某复杂体型高层建筑为例,对其风荷载进行了刚性模型风洞试验研究,并基于 Fluent 6.1 软件平台,将雷诺应力湍流模型(RSM)与非平衡壁面函数搭配使用,对其进行了计算流体动力学(CFD)数值模拟。结果表明:风洞试验与数值模拟2种方法相辅相成;该类高层的迎风面主要受正压作用,屋面、背风面以及侧面主要受负压作用,尤其转角处背风区域局部负压较大;在180°风向角下,该类高层体型本身提供的类似峡谷的风速放大效应显著。

关键词:高层建筑;数值模拟;风压;风洞试验

中图分类号:TU312.1;TU317.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)05-0069-05

Wind Tunnel Test and Numerical Simulation of Wind-Induced Loads on Complex-Shaped High-Rise Buildings

LI Zheng-liang¹, WANG Cheng-qi¹, ZHAO Shi-xing², WEI Qi-ke¹, LIU Hong-jun¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Sichuan Provincial Institute of Architectural Design 610017, P. R. China)

Abstract: Taking a complex-shaped high-rise building as a case, the wind tunnel test with rigid model was carried out for wind load study. Meanwhile, with Fluent 6.1 software, the CFD numerical simulation had been performed with the RSM and the Non-equilibrium Wall Functions. It was found that the results of the two methods were in good agreement. There were mainly positive pressures on the windward surface and negative pressures on the roof, the leeward surface and the side. Especially, negative pressure was higher in the leeward region at the building corner. And at the wind angle of 180°, the wind speed amplification effect was remarkable which was similar to those of canyons.

Key words: buildings; numerical analysis; wind pressure; wind tunnels tests

风导致工程结构损伤和破坏的灾害事故屡见不鲜^[1],如1940年美国Tacoma桥被风吹毁倒塌,1965年英国Ferrybridge电站的8座大型冷却塔在大风中倒塌3座等。随着科学技术的发展,轻质高强材料被广泛采用,大量体型复杂的建筑也不断涌现,其风荷载特性在荷载规范^[2]中并无明确规定(规范仅给出几种简单形状房屋的体型系数供工程参考)。然而,风荷载是高层建筑的主要水平荷载之一,其取值安全合理对于该类结构的设计具有重要意义。

目前对于建筑风荷载的研究分析方法主要有风洞试验方法^[3-10]和建立在数值模拟基础上的数值风洞方法^[11-17]。数值风洞技术(CFD技术)是利用计算流体动力学在计算机上模拟结构周围风场的变化,并求解结构表面风荷载的方法。CFD技术不但成本低、速度快,而且可以获得非常详尽的信息资料,有助于对问题进行多方面模拟分析,以便研究事物的本质和发生的机理。随着计算机技术的发展和计算流体力学理论的进步^[16],采用CFD对钝体绕流进行数值模拟分析,获取建筑物表面的风压及风

收稿日期:2009-05-10

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(90715024)

作者简介:李正良(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事工程力学、结构工程和风工程研究,(E-mail)lizhengli@hotmail.com。

速流线的技术已经比较成熟,在实际的工程实践中也逐渐得到应用。但在结构风工程领域,风所引起的许多复杂作用问题无法在理论上完整解决,必须依赖风洞试验来解决,因此风洞试验仍是结构风工程领域不可缺少的研究手段。该文以某复杂体型高层建筑的风荷载为例,同时采用风洞试验和数值模拟 2 种技术,分析了该类复杂体型高层建筑的风荷载分布规律。

1 风洞试验

1.1 试验概况

该复杂体型高层建筑(图 1)总高 98.2 m,由南北两座独立塔楼相连而成,北座塔楼为 21 层,南座塔楼为 23 层,其中含裙房 4 层,地下室为 3 层。其风洞试验(图 2、图 3)是在中国空气动力研究与发展中心低速气动力研究所 4 m×3 m 风洞工业试验段中进行的。试验模型缩尺比为 1:150,其主体由 6 mm 厚的有机玻璃制成,并安装有 594 个测压孔(图 4)。而模拟 520 m 直径范围内的周围环境(地形地物)均采用木材和泡沫塑料制成。风洞中采用尖塔、格栅和地面粗糙元模拟 D 类地貌大气边界层,其模拟的风速剖面 and 来流纵向湍流强度如图 5 所示。试验在有周围环境时模拟了 24 个风向角,即在 0°到 360°区间内,每间隔 15°为一风向角,详见图 6;试验在无周围环境时模拟了 4 个风向角,即在 0°到 360°区间内,每间隔 90°为一风向角。

在试验前采用计算机数值模拟风洞试验给出大致的压强分布,为试验布置测压孔提供更好的依据,即在压强变化剧烈的地方,测压孔布置得适当密一些,在压强变化平缓的地方,测压孔布置得适当稀一些,如图 4 所示。



图 1 复杂体型高层建筑

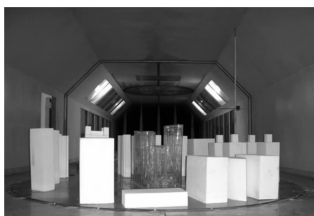


图 2 有周围环境时风洞试验场景

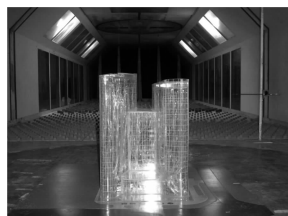


图 3 无周围环境时风洞试验场景

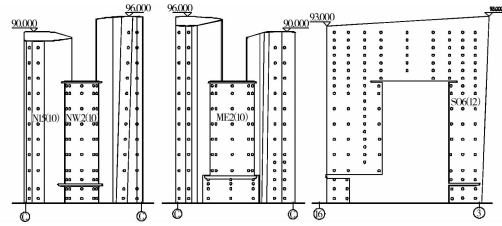


图 4 测压孔布置图(部分)

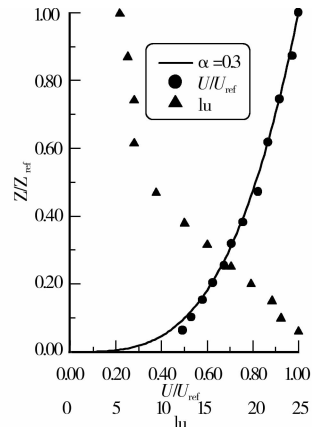


图 5 风洞模拟大气边界层平均速度分布和湍流度分布

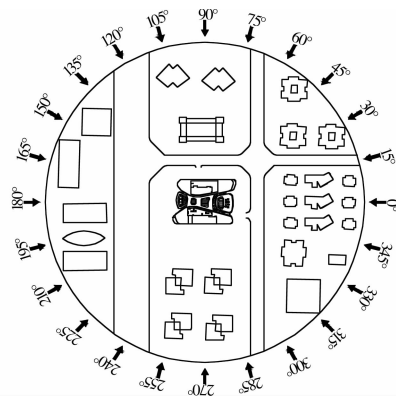


图 6 风向角示意图

1.2 试验数据处理

试验采用美国 Scanivalve 传感器公司生产的电子压力扫描阀压力测量系统来测量模型表面的压力分布。试验中在进行初步数据采集后,及时与数值模拟的结果大致对比,可进一步确保试验成功。试验参考点选在高度 0.5 m 处,对应实际高度 75 m。

对应 i 测点的实际最大风压 $w_{i,max}$ 和实际最小风压 $w_{i,min}$ 分别表示为

$$w_{i,max} = C_{pi,max} w_r \tag{1}$$

$$w_{i,min} = C_{pi,min} w_r \tag{2}$$

其中:

$$C_{pi,max} = C_{pi,mean} + gC_{pi,sd} \tag{3}$$

$$C_{pi,min} = C_{pi,mean} - gC_{pi,sd} \tag{4}$$

$$C_{pi,mean} = \frac{\left(\sum_{i=1}^N (p_i - p_{\infty})\right)}{N} = \frac{p_{i,mean}}{p_r} \quad (5)$$

$$C_{pi,sd} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{p_i - p_{\infty}}{p_0 - p_{\infty}} - C_{pi,mean}\right)^2}{N - 1}} \quad (6)$$

式(1)中, $C_{pi,max}$ 为 i 测点最大风压系数, w_r 为对应试验中参考点高度处的实际风压;式(2)中, $C_{pi,min}$ 为 i 测点最小风压系数;式(3)和式(4)中, $g = 3.0$ (建筑物的局部围护构件抗风计算需要考虑阵风影响,取瞬时风压作为设计风荷载。建筑物表面瞬时风压的时程曲线近似 GAUSS 过程。考虑到实际工程中取略偏安全的保证率,取峰值因子 g 为 $3.0^{[18]}$);式(3)、式(4)和式(6)中, $C_{pi,sd}$ 为均方根风压系数;式(5)中, $C_{pi,mean}$ 为 i 测点的平均风压系数, p_i 为 i 测点的总压(由测压阀实测值减去测压阀初始值所得), p_{∞} 试验中参考点处静压, p_0 为试验中参考点处总压, N 为样本总数, $p_{i,mean}$ 为试验中测压点风压平均值, p_r 为试验中参考点处动压。

1.3 试验结果及分析

为确保该复杂体型高层建筑抗风的安全,数据处理的结果中主要包括考虑周围环境(实际情况)时 50 a 和 100 a 一遇的最大最小风压值以及未考虑周围环境时着重关注的幕墙处在 0° 与 180° 风向角下 50 a 一遇的风压值。该文中仅列出考虑周围环境下,24 个风向角中测压点处的风压最大值(50 a 一遇,单位:Pa),详见图 7。

表 1 有无周围环境下典型测点平均压力系数的对比

典型测点	周围环境有无情况	风向角	
		0°	180°
N15(10)	有(实际情况)	-0.04	0.87
	无	-0.36	1.02
MW2(10)	有(实际情况)	-0.02	1.21
	无	-0.43	1.22
ME2(10)	有(实际情况)	-0.02	0.05
	无	1.30	-0.52
S06(12)	有(实际情况)	-0.49	1.05
	无	-0.40	1.22

试验数据表明该高层的迎风面主要受正压作用,屋面、背风面以及侧面主要受负压作用,尤其转角处背风区域局部负压较大。结合图 4、图 6 和图 8,从表 1 可以看出,该高层在 0° 和 180° 风向角下,其体型本身提供了类似峡谷的风速放大效应,例如,在

180° 风向角下,无或有周围环境时,处于正前方的测点 N15(10)平均压力系数比处于正中的测点 MW2(10)平均压力系数小。实际情况(有周围环境)下,在 0° 风向角下,由于该建筑前方的建筑物多且高,从而遮挡效果显著,如测点 ME2(10)。而在 180° 风向角(最不利风向角)下,前方建筑相对较矮即遮挡作用不大,而风速放大效应明显,此时该高层的迎风面正压值偏大,如测点 MW2(10)。

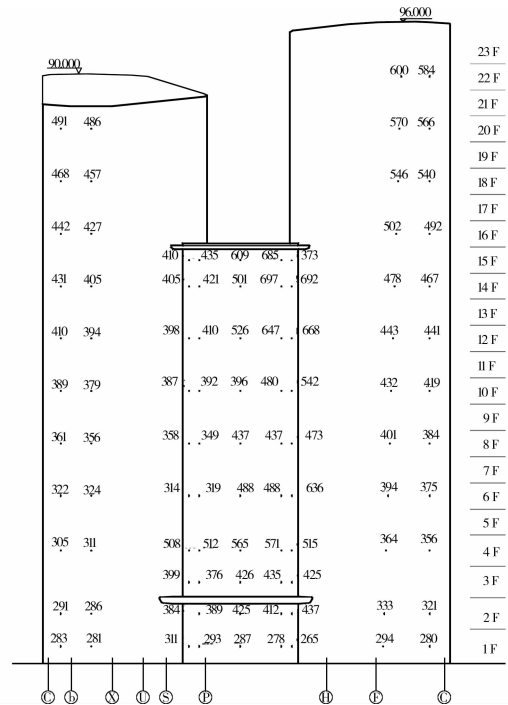


图 7 24 个风向角中测压点处的风压最大值(50 a 一遇)

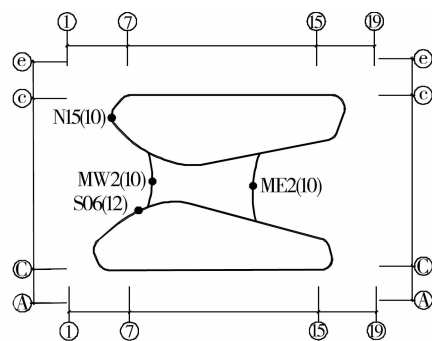


图 8 典型测点示意图

2 数值模拟

2.1 控制方程

近地面风可假设为低速、不可压缩、黏性牛顿流体。其基本控制方程^[16]为时均形式的连续方程和动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right) \quad (8)$$

式中: ρ 为空气密度, u_i 为时均速度, u_i' 为时均脉动速度, p 为时均压强, μ 为湍动黏度。因为考虑脉动的影响,式(8)中增加了 6 个 Reynolds 应力项 $-\rho \overline{u_i u_j}$, 使得方程组不闭合。引入 RSM 湍流模型使得方程封闭进行求解计算。

2.2 计算域和网格划分

使用 Gambit 进行足尺建模。计算流域大小取为 $1\,000\text{ m} \times 450\text{ m} \times 800\text{ m}$, 并认为该流域大小已足以模拟建筑所处的大气环境。对所建模型采用非结构网格进行划分, 通过对建筑物表面及其附近的网格进行加密, 并由加密处往外逐渐增大网格, 来协调计算精度和计算时间的矛盾。

2.3 边界条件

入口边界条件: 来流为剪切流, 模拟 D 类地貌, 来流湍流特性通过 UDF (User Defined Function) 直接给定湍流动能 k 和湍流耗散率 ϵ 。

出口边界条件: 采用完全发展的出流边界条件, 即流场任意物理量沿出口法向梯度为零。

流体域顶部和两侧: 自由滑移的壁面条件。

建筑物表面和地面: 无滑移的壁面条件。

2.4 计算求解

计算采用 3D 单精度分离式求解器。选用 RSM 湍流模型进行计算, 并利用非平衡壁面函数来修正 RSM, 以使得 RSM 适用于近壁面区域。离散化处理控制方程采用一阶迎风格式。选择 SIMPLE 算法求解有限体积积分得到的压力-速度相关控制方程组。通过监测控制方程的迭代残余量以及各表面压力变化来判定是否收敛, 即当相对迭代残余量均小于 5×10^{-3} , 且各表面风压系数基本不发生变化时, 认为所得流场进入了稳态。

2.5 计算结果及分析

分别模拟计算了该高层考虑周围环境时 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 方向来流情况以及未考虑周围环境时 0° 、 90° 、 270° 、 180° 方向来流情况。文中图 9 和图 10 为考虑周围环境下, 风向角 0° 和 180° 时压力云图 (压力云图以 X 向为来流, Y 向为高度, 单位: Pa)。

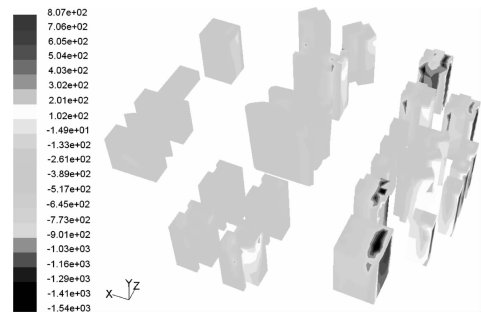


图 9 风向角 0° 度时压力云图/Pa

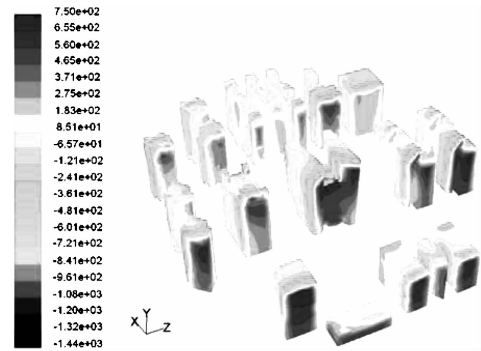


图 10 风向角 180° 度时压力云图/Pa

数值模拟的结果从整体趋势看, 与风洞试验比较吻合, 如表 2。由于拐角区域脱落的漩涡使得该区域产生较大的吸力, 而计算模型的拐角是理想化的尖角, 更加速了漩涡的脱落, 提高了该处的分离流强度, 从而导致了模拟结果在此区域的负压略大于试验结果。

表 2 两种方法下典型测点平均压力系数的对比

典型测点	方法	风向角							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
N15 (10)	数值模拟	-0.02	-0.17	-0.45	0.83	0.84	0.87	-0.58	-0.51
	风洞试验	-0.04	-0.20	-0.40	0.81	0.87	0.84	-0.55	-0.45
MW2(10)	数值模拟	-0.01	-0.19	-0.41	0.92	1.20	0.90	-0.50	-0.44
	风洞试验	-0.02	-0.17	-0.45	0.83	1.21	0.82	-0.46	-0.42
ME2(10)	数值模拟	-0.02	-0.18	-0.44	0.07	0.05	-0.12	-0.48	-0.13
	风洞试验	-0.02	-0.16	-0.47	0.06	0.05	-0.09	-0.44	-0.16
S06(12)	数值模拟	-0.52	-0.14	-0.52	0.90	1.10	0.41	-0.55	-0.40
	风洞试验	-0.49	-0.14	-0.50	0.86	1.05	0.37	-0.51	-0.44

3 结 论

通过对此类高层进行刚性模型风洞试验及数值模拟研究,得到以下结论:

1)数值模拟作为风洞试验的辅助手段,在试验前可优化布置测压点,试验中可数据辨伪,试验后可进行数据对比等。在与试验数据对比中可见数值模拟采用RSM湍流模型与非平衡壁面函数搭配使用,其模拟效果较好,误差可以接受。

2)风洞试验和数值模拟结果均表明,该高层的迎风面主要受正压作用,屋面、背风面以及侧面主要受负压作用,尤其转角处背风区域局部负压较大。由于数值模拟从整体趋势看,与风洞试验比较吻合,因此数值模拟的风压云图有一定的设计参考价值。

3)该高层在 0° 和 180° 风向角下,其体型本身提供了类似峡谷的风速放大效应。实际情况中,在 0° 风向角下,该建筑前方的建筑物多且高,从而遮挡效果显著。而在 180° 风向角(最不利风向角)下,前方建筑相对较矮即遮挡作用不大,此时该高层的迎风面正压值偏大。

参考文献:

- [1] BAKER C J. Wind engineering-past, present and future [J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2007, 95: 846-870.
- [2] GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [3] XIE Z N, GU M. Mean interference effects among tall buildings[J]. Eng. Struct, 2004, 26: 1173-1183.
- [4] 楼文娟,李恒,魏开重,等. 典型体型高层建筑双层幕墙风压分布试验[J], 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(2): 296-301.
- LOU WEN-JUAN, LI HENG, WEI KAI-ZHONG, et al. Wind tunnel test study on wind pressure distribution on double-skin facades of high-rise buildings with typical shapes [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(2): 296-301.
- [5] 顾明,李刚,黄鹏,等. 某大厦风荷载试验研究[J], 建筑结构, 2009, 39(3): 113-115.
- GU MING, LI GANG, HUANG PENG, et al. Test study of wind loading on a tall building[J]. Building Structure, 2009, 39(3): 113-115.
- [6] ZHANG AI, GU MING. Wind tunnel tests and numerical simulations of wind pressures on buildings in staggered arrangement [J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2008, 96:2067-2079.
- [7] XIE Z N, GU M. Simplified evaluation of wind-induced interference effects among three tall buildings [J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2007, 95, 31-52.
- [8] 张亮亮,李正良,彭新宇,等. 绵阳南郊机场航站楼大楼风压分布研究[J]. 重庆建筑大学学报,2004, 26(1):5-9.
- ZHANG LIANG-LIANG, LI ZHENG-LIANG, PENG XIN-YU, et al. Research of wind pressure on Mianyang southern suburb airport terminal building [J]. Journal of Chongqing Architecture University, 2004, 26(1): 5-9.
- [9] TSE K T, HITCHCOCK P A, KWOK K C S. Mode shape linearization for HFBB analysis of wind-excited complex tall buildings [J]. Engineering Structures, 2009, 31: 675-685.
- [10] 顾明,张建国. 高层建筑顺风向脉动荷载相干性研究 [J]. 土木工程学报, 2008, 41(11): 18-22.
- GU MING, ZHANG JIAN-GUO. Coherence analysis of along-wind fluctuating loads on high-rise buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11): 18-22.
- [11] AHSAN KAREEM. Numerical simulation of wind effects: A probabilistic perspective[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2008, 96: 1472-1497.
- [12] ZHANG AI-SHE, GAO CUI-LAN, ZHANG LING. Numerical simulation of the wind field around different building arrangements [J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 2005, 93: 891-904.
- [13] CARASSALE L, SOLARI G. Monte Carlo simulation of wind velocity fields on complex structures [J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2006, 94, 323-339.
- [14] 沈祺,王国砚,顾明. 多幢高层建筑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.
- SHEN QI, WANG GUO-YAN, GU MING. Numerical simulation of wind loads on high-rise buildings and disaster analysis [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(5): 592-597.
- [15] HIROTO KATAOKA. Numerical simulations of a wind-induced vibrating square cylinder within turbulent boundary layer[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2008, 96: 1985-1997.
- [16] KEMAL HANJALIC, SASA KENJERES. Some developments in turbulence modeling for wind and environmental engineering [J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2008, 96, 1537-1570.
- [17] 王承启. 复杂体型建筑风荷载数值模拟及试验研究 [D]. 重庆:重庆大学土木工程学院,2006.
- [18] 张相庭. 结构风工程—理论. 规范. 实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.

(编辑 胡英奎)