

文章编号:1673-2049(2019)06-0072-08

外凸式矩形高层建筑风压研究

何晗欣¹, 张亮亮², 杨鹏瑞³, 高亮⁴

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 山西省交通科学研究院有限公司, 山西 太原 030006; 3. 长安大学 公路大型结构安全教育部工程中心, 陕西 西安 710064; 4. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048))

摘要:针对外凸式矩形高层建筑结构外形复杂且其风荷载值无法通过建筑荷载规范直接获得的情况,以丝绸之路世界贸易中心外凸式矩形高层建筑为研究对象,通过风洞试验获得其风荷载值,并与规范给出的矩形结构体型系数进行对比,总结外凸式矩形建筑结构风荷载规律。基于 Fluent 软件,选用不同湍流模型,对外凸式矩形高层建筑进行数值模拟,并将计算结果与风洞试验结果进行比较,验证数值模拟方法的可行性。结果表明:该高层建筑迎风面的体型系数与规范接近;背风面底部区域的体型系数比规范值大约 70%,其他区域与规范值接近;侧面体型系数均大于规范值,且最大负压出现在侧面;对于外凸式矩形高层建筑结构,外凸结构风压较相邻区域增大,凹进结构的风压较相邻区域减小;体型系数沿高度方向变化较大,凸出结构为迎风面时,其下方相邻区域体型系数比规范值小近 50%;数值计算结果与试验数据整体趋势基本一致;Realizable $k-\epsilon$ 模型的数值模拟结果要优于 Standard $k-\epsilon$ 模型;对于矩形高层建筑,凸出结构为迎风面时,其相邻上部区域和背风面下部区域风荷载不仅受凸出结构的影响,而且还受到凸出结构宽度的影响,其对体型系数的影响幅度为 $\pm 20\%$ 之间。

关键词:外凸式高层建筑;体型系数;风洞试验;数值模拟

中图分类号:TU317.1

文献标志码:A

Study on Wind Pressure of Outer Convex Rectangular High-rise Building

HE Han-xin¹, ZHANG Liang-liang², YANG Peng-rui³, GAO Liang⁴

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 2. Shanxi Transportation Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030006, Shanxi, China; 3. Engineering Research Center of Highway Large Scale Structure Ministry of Education Safety, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: In view of the complex shape of the external convex rectangular high-rise building structure and the fact that its wind load value cannot be directly obtained through the building load code, the external convex rectangular high-rise building of Silk Road World Trade Center was taken as study object, and its wind load value was obtained through wind tunnel test. The wind load law of the external convex rectangular building structure was summarized through comparing the test value of the shape coefficient of rectangular structure with the value given by the code. Based on Fluent software, different turbulence models were selected to simulate the

收稿日期:2019-03-07

基金项目:陕西省教育厅专项科研项目(17JK0441);陕西省自然科学基金基础研究基金青年人才项目(2017JQ5079)

作者简介:何晗欣(1981-),女,陕西西安人,讲师,工学博士,E-mail:hehanxin@126.com。

convex rectangular high-rise building, and the results were compared with the wind tunnel test results to verify the feasibility of the numerical simulation method. The results show that the shape coefficient of the windward side of the high-rise building is close to the standard. The shape coefficient of the leeward bottom area is about 70% higher than the standard value, and other areas are close to the standard value. The shape coefficient of the side is higher than the standard value, and the maximum negative pressure appears on the side. For the convex rectangular high-rise building structure, the wind pressure of the convex structure is higher than that of the adjacent area, and the wind pressure of the concave structure is lower than that of the convex structure. The shape coefficient changes greatly along the height direction. When the protruding structure is windward, the shape coefficient of the adjacent area below it is nearly 50% smaller than the standard value; the numerical calculation results are basically consistent with the overall trend of the test data; the numerical simulation results of Reliable $k\epsilon$ model are better than that of Standard $k\epsilon$ Model. For rectangular high-rise buildings, when the protruding structure is windward, the wind load of adjacent upper area and lower area of leeward surface is not only affected by the protruding structure, but also by the width of the protruding structure, and its influence range on the shape coefficient is $\pm 20\%$.

Key words: outer convex high-rise building; shape coefficient; wind tunnel test; numerical simulation

0 引言

高层建筑是对风荷载极其敏感的结构,其风效应是结构工程师设计时关注的热点问题^[1]。随着经济的发展,建筑越来越高,外形也越来越奇特。现有规范^[2]已经不能准确地指导外凸式矩形高层建筑风荷载的估算,且存在相邻建筑物干扰时,风荷载会发生显著变化。因此,针对特殊外形的建筑结构通过风洞试验或数值模拟获取风荷载设计参数是十分必要的。针对考虑周围建筑物相互干扰作用时复杂体型高层建筑的风荷载^[3-6],Boggs等^[7]通过研究指出建筑外形及周围建筑物都会对其风荷载扭转作用产生影响;全涌等^[8]分析了某复杂外形高层建筑立面最不利风压系数,得出最不利风压系数与尾流分流有关,且受建筑局部外形特征影响较大;章李刚等^[9]对某复杂外形超高层建筑进行风荷载响应分析,结果表明复杂外形使其产生明显扭转向响应分量;沈国辉等^[10-11]对不规则高层建筑物风荷载进行研究,发现体型系数沿高度方向变化较大,认为在计算高层建筑体型系数时应分区计算;Murakam等^[12]用 $k\epsilon$, LES, ASM 三种湍流模型对某高层建筑进行数值计算,发现对于钝体绕流流场 $k\epsilon$ 湍流模型模拟效果较好;Tamura^[13]利用 LES 湍流模型对 2 栋平行高层建筑的风荷载进行数值计算,认为该湍流模型能更好地预测结构表面风压;李正良等^[14-15]对某

复杂体型高层建筑表面风压进行了风洞试验和数值模拟,认为数值模拟结果整体趋势与风洞试验结果一致。

本文以丝绸之路世界贸易中心为工程背景,该高层建筑的 24 层至 26 层沿对角线方向凸出 9 m。这种中间部分楼层外凸的造型目前没有风荷载的相关资料,故需风洞试验确定其风荷载,并借助 CFD 技术研究此类结构合理的数值模拟方法^[16-19],对风洞试验进行适当补充。通过与规范对比得到该类结构的风荷载特点及变化规律,为类似高层建筑结构抗风设计提供参考。

1 风洞试验

1.1 试验概况

丝绸之路世界贸易中心(图 1)的主楼高度为 148.1 m,总共 30 层,女儿墙高为 12 m。风洞试验模型见图 2,该模型表面进行粗糙化处理,弱化了其雷诺数效应影响,模型几何缩尺比为 1:200,试验在长安大学风洞实验室进行。考虑到丝绸之路世界贸易中心的地理位置及周围地形地貌特点,该建筑地面粗糙度类别选为 C 类,在风洞利用湍流发生装置生成了 C 类风场的风速剖面及湍流度剖面,见图 3。试验风速取 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,采用美国 PSI 公司的电子压力扫描阀进行测压试验,采样频率为 312.5 Hz,采样时长约 70 s。



图 1 建筑效果图

Fig. 1 Architectural Renderings

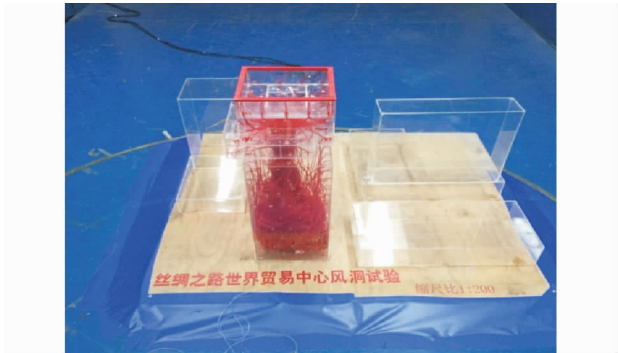


图 2 试验模型

Fig. 2 Test Model

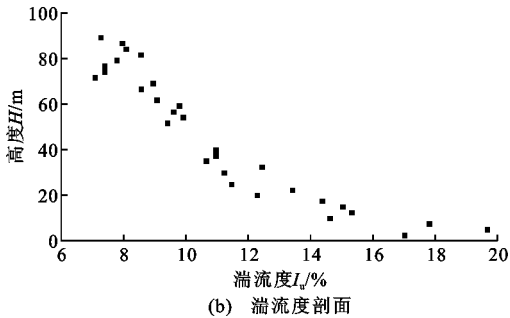
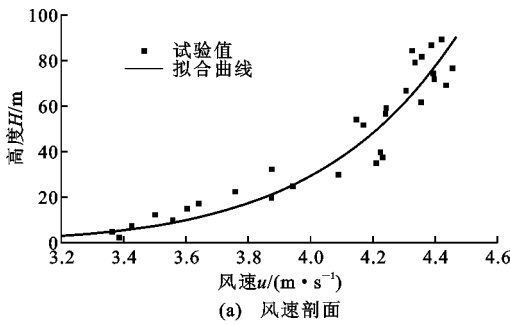


图 3 风场模拟示意图

Fig. 3 Sketches of Wind Field Simulation

1.2 试验工况与测点布置

为了得到该贸易中心表面在不同来流方向下不同高度 H 处的风荷载,共布置了 420 个测点。图 4 为 0° 风向角时迎风面(C 面)上的测点布置示意图,

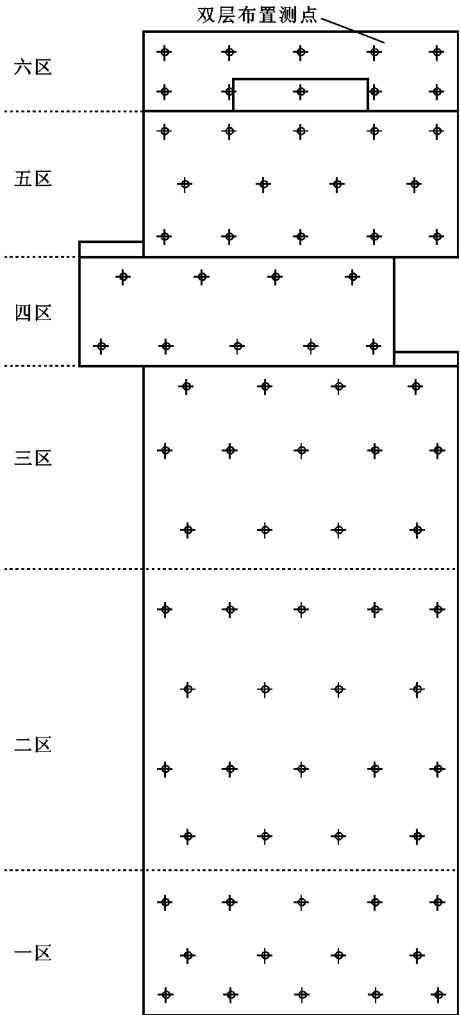


图 4 迎风面测点布置

Fig. 4 Layout of Measuring Points on Windward

侧面及背面同高度处的测点布置一样。试验共模拟了 24 个风向角,即在 0° 到 360° 之间,每隔 15° 为 1 个风向角,模型风洞试验风向角示意图见图 5。

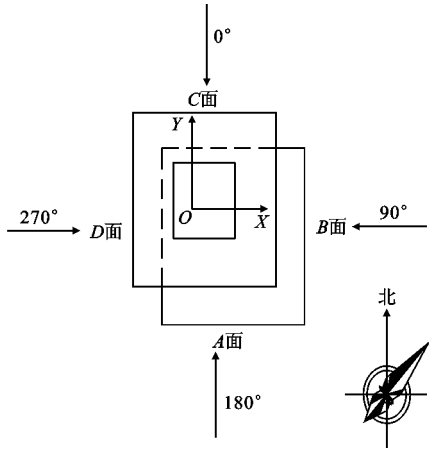


图 5 风向角示意图

Fig. 5 Sketch of Wind Angle

1.3 试验结果处理与分析

1.3.1 试验数据处理

测压点的量纲一风压系数 C_{pir} 、整体风荷载体型系数 μ_s 分别为

$$C_{pir} = \frac{p_i - p_{r\infty}}{p_{r0} - p_{r\infty}} = \frac{p_i - p_{r\infty}}{q_r} \quad (1)$$

$$\mu_s = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{si} A_i}{A'} \quad (2)$$

式中: p_i 为测压点 i 处的静压; p_{r0} 、 $p_{r\infty}$ 分别为参考点处的总压和静压; q_r 为参考点高度处的动压; μ_{si} 为局部风荷载体型系数; A_i 为测压点 i 的附属面积; A' 为该分区所有测压点的面积。

1.3.2 试验数据分析

根据该贸易中心的外形划分为 6 个区,其中四区为凸出结构区域,六区为女儿墙(双面测压)。按式(1),(2)计算各区的整体风荷载体型系数,并与规范体型系数对比。表 1 给出了该贸易中心在 0° 、 180° 风向角时的各分区体型系数。

表 1 0° 、 180° 风向角时的各分区体型系数

Tab. 1 Regional Shape Coefficients at 0° and 180° Wind Angles						
位置	风向角/(°)	体型系数				
		一区	二区	三区	四区	五区
迎风面	0(C 面)	0.71	0.67	0.73	0.62	0.74
	180(A 面)	1.01	0.45	0.62	0.79	0.74
背风面	0(A 面)	−0.79	−0.65	−0.56	−0.58	−0.60
	180(C 面)	−1.05	−0.75	−0.63	−0.66	−0.69
B 侧面	0	−1.25	−1.00	−0.98	−0.86	−0.88
	180	−1.20	−0.88	−0.76	−0.99	−0.89
D 侧面	0	−0.19	−0.46	−0.62	−0.72	−0.74
	180	−1.20	−0.96	−0.83	−0.79	−1.06

规范给出了高度超过 45 m 的矩形截面高层建筑体型系数(图 6, D' 、 B' 分别为高层建筑物的长度和宽度),外凸式矩形高层建筑与之对比可见:①迎风面均为正压, 0° 风向角时,迎风面各区体型系数基本和规范值 0.8 接近; 180° 风向角时,一区的体型系数较规范增大了约 25%,二区的体型系数较规范减小了约 44%,这是由于来流上游建筑物和四区凸出结构影响其流场造成的;②背风面均为负压, 0° 和 180° 风向角时,背风面下部一区的体型系数都要大于规范值 0.6,在 180° 风向角时增大近 70%,其他分区的体型系数与规范值接近;③ B 侧面也均为负压, 0° 和 180° 风向角时,各分区的压力系数均大于规范值 0.7,且最大负压出现在该侧面;在 180° 风向角

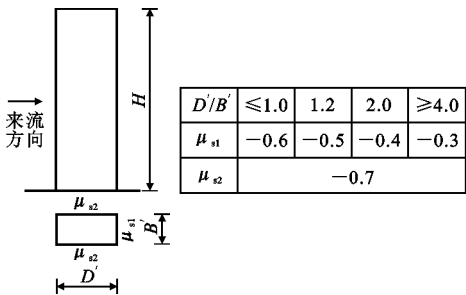


图 6 高度超过 45 m 矩形截面高层建筑体型系数

Fig. 6 Shape Coefficients of Rectangular High-rise

Building with a Height More than 45 m

时,四区凸出结构区域的体型系数比它相邻区域增大了 15%~20%;④ D 侧面大部为负压,在建筑物底部分区域为正压;一、二、三区体型系数在 0° 和 180° 风向角时相差较大,这是由于周围建筑物在其来流方向的上游还是下游造成的;在 180° 风向角时,四区凹进结构区域的体型系数比它相邻区域减小了 5%~15%;⑤ 一~五区是沿建筑高度划分,各区体型系数沿高度方向变化较大,在 180° 风向角时,凸出结构为迎风面,二区的体型系数较一区减小近 200%,较规范值小 50%。可见外凸式高层建筑风荷载在设计时需要考虑周围建筑物的相互干扰作用,对凸出结构应予以重视。计算该类建筑结构体型系数时,应根据高度及外形进行分区,同一面应根据高度及外形变化取值,而不是采用单一系数值。

2 数值模拟

2.1 控制方程

钝体绕流问题的控制方程是黏性不可压 N-S 方程,其基本控制方程为雷诺平均的连续方程和动量方程,即

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho u_i u_j) \quad (4)$$

式中: ρ 为空气密度; u_i 为时均速度; u_j 为时均脉动速度; p 为时均压强; μ 为湍动黏度。

Standard $k-\epsilon$ 模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型,有类似的形式,即都有湍动能和耗散率的输运方程,区别在于计算湍流黏性的方法不同、控制湍流扩散的湍流普朗特数不同等。

2.2 计算域与网格划分

采用 ICFM CFD 进行建模。数值模拟计算模型尺寸与风洞相同,计算模型采用六面体非结构网格划分,对建筑物表面及其附近区域进行加密,并在

加密处往外逐渐加大网格尺寸,以此来保证计算精度和计算速度。图 7 为计算模型及网格划分情况。

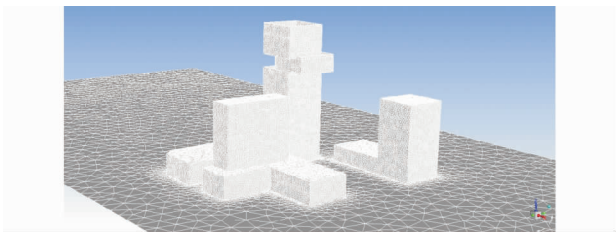


图 7 模型及网格
Fig. 7 Model and Mesh

2.3 边界条件与计算求解

入流面采用速度入口,使用 Fluent 提供的 UDF 来模拟 C 类大气边界层风速剖面 and 湍流度剖面。出流面采用压力出口边界条件。流域顶面与两侧面采用对称边界条件。流域底面与建筑物表面采用无滑移的壁面条件。分别选用 Standard $k-\epsilon$ 和 Realizable $k-\epsilon$ 两种湍流模型进行计算。

2.4 计算结果分析

2.4.1 表面风压分析

分别模拟计算了 Standard $k-\epsilon$ 模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型 2 种考虑周围环境时 0° 风向角来流情况。图 8 为 Realizable $k-\epsilon$ 模型 0° 风向角时压力云图(压力云图以 X 向为来流,Z 向为高度)。从图 8 可知,迎风面为正压,侧面及背风面为负压。

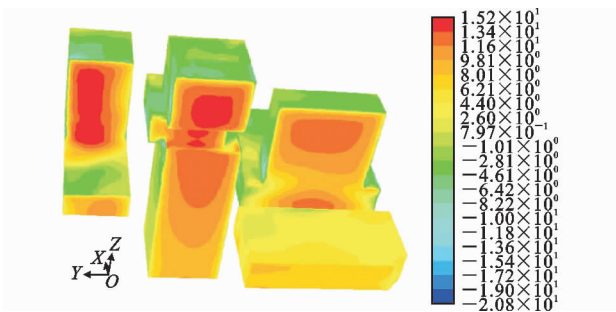


图 8 Realizable $k-\epsilon$ 模型 0° 风向角时压力云图(单位:Pa)
Fig. 8 Pressure Contours of Realizable $k-\epsilon$ Model at 0° Wind Angle (Unit:Pa)

图 9 给出了 0° 风向角下建筑迎风面(C 面)、B 侧面、D 侧面、背风面(A 面)所选线条上的风压系数,所有的风压系数均以 B 类场地 10 m 高度为参考高度,该线条为建筑结构各面的中轴线。

由图 9 可见,数值模拟结果与风洞试验结果在迎风面和处在分离区侧面吻合较好,而在背风面误差较大,与文献[20]的结论一致。数值模拟计算结果与风洞试验结果整体趋势一致。2 种模型在迎风

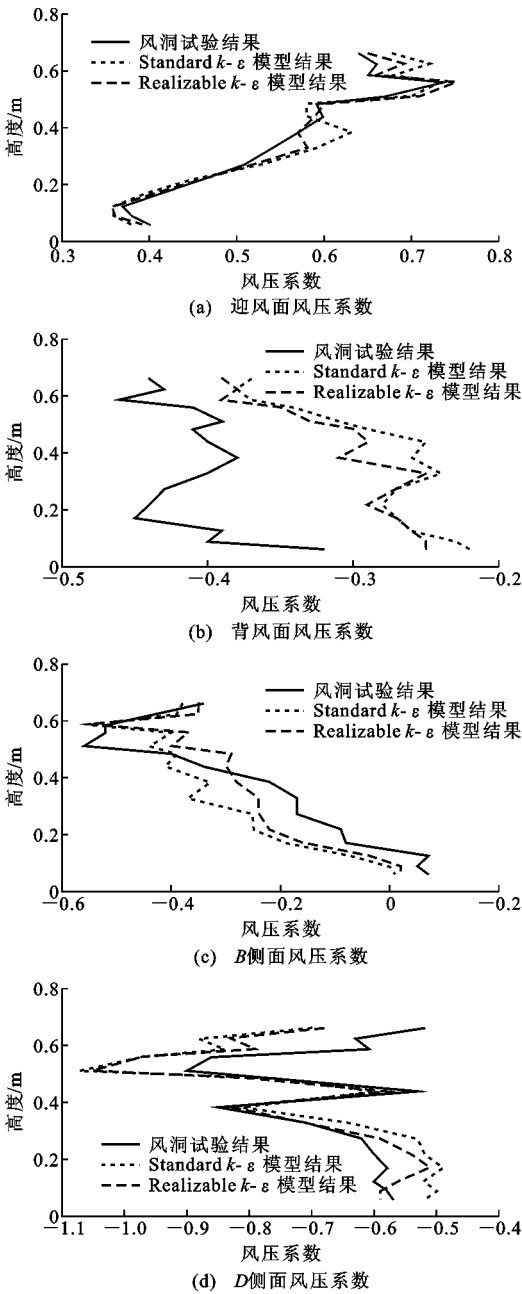


图 9 数值模拟计算结果与风洞试验结果平均风压系数对比
Fig. 9 Mean Wind Pressure Coefficient Comparison Between Numerical Simulation and Wind Tunnel Test Results

面和侧面的计算相对误差基本都在 10% 以内,背风面误差相对较大,并且 Realizable $k-\epsilon$ 模型计算结果相比 Standard $k-\epsilon$ 模型更接近试验结果,说明 Realizable $k-\epsilon$ 模型对不规则外形高层建筑结构的模拟更为合理,对不规则外形高层建筑周围的分离、涡旋、环绕等复杂流体现象具有更好的预测效果。在模型高 0.48~0.6 m 间(位于图 4 中四区),迎风面和侧面平均风压系数会有明显的突变现象,而背风面则相对平缓,这与风洞试验结果吻合。

2.4.2 流场分析

图 10 为 Realizable $k-\epsilon$ 模型中心截面立面流场迹线图和 0° 风向角时顺风向水平剖面流场迹线图,其中水平剖面图高度为 0.5 m,对应实际高度为 100 m(位于图 4 中四区)。由图 11 可见,当气流撞在建筑物迎风面时,使气流改向四周外围流去,且在迎风面为凹进结构产生旋涡致使能量损失,这也是凹进结构风压小于相邻区域风压的原因。在建筑侧面靠近迎风面前角处有明显的气流分离和回流附着现象。在建筑背风面,由于主要承受负压,在凸出结构上下区域均产生涡旋回流,即凸出结构的表面风压大于其相邻区域。在 2 个高楼间风速会增大,产生巷道风效应,使得 180° 风向角时迎风面底部区域的体型系数大于 0° 风向角时的体型系数。丝绸之路世界贸易中心属于体型不规则的方柱结构,其周围流场因与周边高层建筑之间的相互干扰而变得复杂。该数值模拟能较为准确地预测其流场的规律。

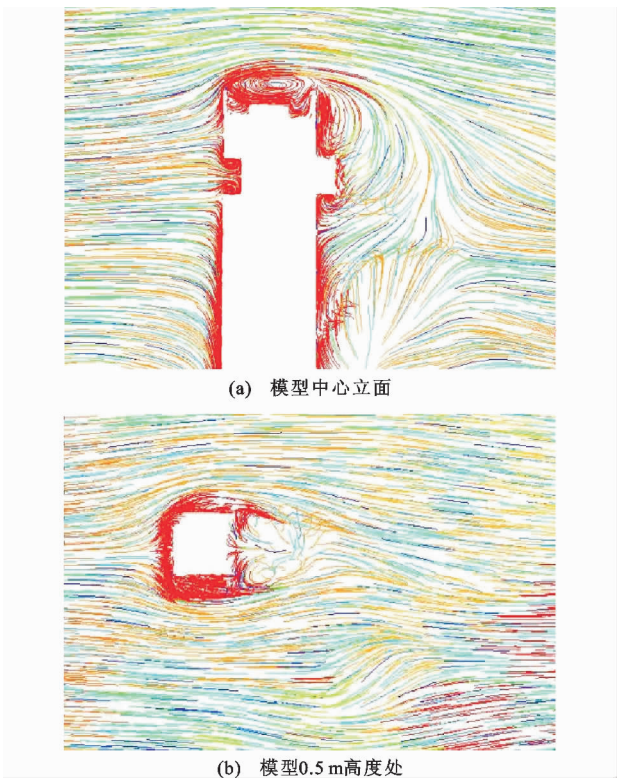


图 10 流场迹线图
Fig. 10 Flow Filed Trace

3 外凸结构对矩形高层建筑风荷载的影响

为了进一步研究该类凸出式矩形高层建筑风荷载规律,在不考虑周围建筑物影响的情况下,本文通

过数值模拟分别计算了凸出结构为迎风面和背风面时 $b/B'=0,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6$ 各工况的体型系数(b 为凸出结构的宽度,如图 11 所示),凸出的 2 个方向尺寸相同。限于篇幅原因,表 2 只列出凸出结构为迎风面、背风面时各工况数值模拟计算结果。

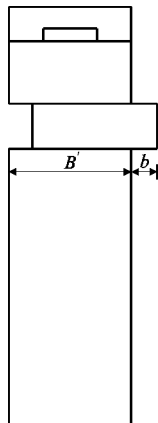


图 11 外凸类高层结构示意
Fig. 11 Sketch of Outer Convex High-rise Structure

表 2 凸出结构为迎风面、背风面时数值模拟计算结果
Tab. 2 Numerical Simulation Results of Convex Structure Which Is Windward and Leeward

位置	区域	不同 b/B' 下的体型系数					
		0.0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
迎风面	一区	0.81	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	二区	0.74	0.75	0.75	0.76	0.76	0.77
	三区	0.88	0.84	0.85	0.85	0.85	0.85
	四区	0.91	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96
	五区	0.92	0.83	0.80	0.80	0.76	0.74
背风面	一区	-0.98	-0.90	-0.89	-0.89	-0.86	-0.85
	二区	-0.65	-0.57	-0.55	-0.54	-0.53	-0.52
	三区	-0.46	-0.42	-0.43	-0.42	-0.42	-0.43
	四区	-0.46	-0.46	-0.47	-0.46	-0.45	-0.46
	五区	-0.43	-0.48	-0.49	-0.5	-0.5	-0.51

由表 2 可知:①在迎风面,建筑底部的一区和二区、凸出结构相邻下部三区、凸出结构四区的体型系数在 $b/B'=0\sim0.2$ 时变化相对较大,其变化幅度在 $\pm 5\%$ 之间,而在 $b/B'=0.2\sim0.6$ 时变化非常小,表明其体型系数值的改变只与有无凸出结构相关,而与凸出结构的宽度几乎无关;凸出结构相邻上部五区随着 b/B' 值的增大,其体型系数减小,有无凸出结构相差近 20% ;②在背风面,建筑底部的一区和二区随着 b/B' 值的增大,其体型系数绝对值减小,有无凸出结构相差 $15\%\sim20\%$;在上部三、四、五区的体型系数 $b/B'=0\sim0.2$ 时变化相对较大,其变化幅度在 $\pm 10\%$ 之间,表明其体型系数只与有无凸出

结构相关,而与凸出结构的宽度几乎无关。可见,对于矩形高层建筑,有无凸出结构对其风荷载影响较明显,尤其是凸出结构为迎风面时,其凸出结构相邻上部区域和背风面下部区域风荷载不仅受凸出结构的影响,而且还受到凸出结构宽度的影响,其对体型系数的影响幅度在 $\pm 20\%$ 之间。

对于外凸式矩形高层建筑,由于其外凸结构及其宽度在不同区域对其体型系数的影响各有差异,即宜通过风洞试验确定其体型系数,且同一面应根据高度及外形变化进行取值,进而计算其结构的风荷载。

4 结 语

(1)该外凸式高层建筑迎风面的体型系数风洞试验结果与规范接近;背风面底部区域的体型系数比规范值大约 70%,其他区域与规范值接近;侧面体型系数均大于规范值,且最大负压就出现在侧面;由于周围建筑物的相互干扰作用,使得 0° 与 180° 风向角时的各面体型系数相差较大,所以在抗风设计和风洞试验时,都应考虑周围建筑物的干扰作用。

(2)对于外凸式矩形高层建筑结构,在突变高度处压力系数会发生突变,突出结构风压较相邻区域增大,凹进结构的风压较相邻区域减小,因此在设计时要着重关注外凸结构。

(3)体型系数沿高度方向变化较大,凸出结构为迎风面时,其下方相邻区域体型系数比规范值小近 50%。因此,在计算该类外凸式建筑结构体型系数时,应根据高度及外形进行适当分区,同一面应根据高度及外形变化进行取值,而不是采用单一系数值。

(4)从试验结果与计算结果都可看出高层结构的迎风面是正压区,背风面及侧面基本都是负压区,数值计算结果与试验数据整体趋势基本一致,即数值模拟得到的压力云图、速度矢量图等可以作为风洞试验结果的补充。

(5)Standard k_ϵ 模型和 Realizable k_ϵ 模型对迎风面和侧面的模拟结果都比较好,对背风面的模拟结果不理想,且 Realizable k_ϵ 模型的模拟结果要优于 Standard k_ϵ 模型。

(6)对于矩形高层建筑,有无凸出结构对其风荷载影响较明显,影响幅度在 $\pm 20\%$ 之间,且凸出结构为迎风面时,其宽度对其相邻上部区域和背风面下部区域的体型系数有影响,对其他区域几乎没有影响。

参考文献:

References:

- [1] HOLMES J D. 结构风荷载[M]. 2 版. 全涌,李加武,顾明,译. 北京:机械工业出版社,2016.
HOLMES J D. Wind Loading of Structures[M]. 2nd ed. Translated by QUAN Yong, LI Jia-wu, GU Ming. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [2] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2012, Load Code for the Design of Building Structures[S].
- [3] 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.
ZHANG Min, LOU Wen-juan, HE Ge-jun, et al. Numerical Study on Interference Effects of Wind Loads About a Cluster of Tall Buildings [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1): 179-185.
- [4] 于敬海,王莹,曲文超. 高层建筑风荷载干扰效应数值模拟研究[J]. 低温建筑技术, 2012, 34(2): 45-47.
YU Jing-hai, WANG Ying, QU Wen-chao. Numerical Simulation Study on Wind Loads Interference Effect of High-rise Buildings [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2012, 34(2): 45-47.
- [5] 方鄂华. 高层建筑钢筋混凝土结构概念设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
FANG E-hua. Conceptual Design of Reinforced Concrete Structure for High-rise Buildings [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [6] 方鄂华,钱稼茹,叶列平. 高层建筑结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003.
FANG E-hua, QIAN Jia-ru, YE Lie-ping. Design of High-rise Building Structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [7] BOGGS D W, HOSOYA N, COCHRAN L. Sources of Torsional Wind Loading on Tall Buildings: Lessons from Wind Tunnel [C]//ASCE. Structural Engineering 2000. Philadelphia: ASCE, 2000.
- [8] 全涌,严志威,顾明,等. 局部外形特征对高层建筑立面上围护结构风荷载的影响[J]. 振动与冲击, 2009, 28(12): 132-135.
QUAN Yong, YAN Zhi-wei, GU Ming, et al. The Effects of Local Shape Characteristics on Wind Loads on the Facades of High-rise Buildings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(12): 132-135.
- [9] 章李刚,楼文娟. 复杂外形超高层建筑结构三维风致响应分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(24): 38-43.

- ZHANG Li-gang, LOU Wen-juan. Three Dimensional Wind-induced Responses of Super-tall Buildings with Irregular Geometric Shapes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(24): 38-43.
- [10] 沈国辉, 孙炳楠, 楼文娟. 复杂体型高层建筑单体和双塔时的风荷载[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(8): 1229-1233, 1264.
- SHEN Guo-hui, SUN Bing-nan, LOU Wen-juan. Wind Load on Complicated-shape Tall Building Under Single Building and Double Tower Conditions[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(8): 1229-1233, 1264.
- [11] 田文高. 不规则外形高耸建筑的风荷载研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- TIAN Wen-gao. Research on the Body Wind Load of Complicated Tall Building[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [12] MURAKAMI S, MOCHIDA A. 3-D numerical Simulation of Airflow Around a Cubic Model by Means of the $k-\epsilon$ Model[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 31(2/3): 283-303.
- [13] TAMURA T. Reliability on CFD Estimation for Wind-structure Interaction Problems[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81: 117-143.
- [14] 李正良, 王承启, 赵仕兴, 等. 复杂体型高层建筑风洞试验及数值模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(5): 69-73.
- LI Zheng-liang, WANG Cheng-qi, ZHAO Shi-xing, et al. Wind Tunnel Test and Numerical Simulation of Wind-induced Loads on Complex-shaped High-rise Buildings[J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(5): 69-73.
- [15] 苏 国, 陈水福. 复杂体型高层建筑表面风压及周围风环境的数值模拟[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 144-149.
- SU Guo, CHEN Shui-fu. Numerical Simulation of Wind Pressures and Wind Environment Around a Complex-shaped High-rise Building[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8): 144-149.
- [16] 汤怀强, 邹良浩, 梁枢果, 等. 基于扭转强迫振动风洞试验的矩形截面高层建筑三维风荷载研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 116-123.
- TANG Huai-qiang, ZOU Liang-hao, LIANG Shu-guo, et al. Three-dimensional Wind Loads of Rectangular Tall Buildings Based on Torsional Forced Vibration Wind Tunnel Tests[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(7): 116-123.
- [17] 关立军. 基于风洞试验的超高层建筑风载研究[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(8): 57-61.
- GUAN Li-jun. Study of Wind Load on Tall Building Base on the Wind Tunnel Test[J]. Low Temperature Architecture, 2018, 40(8): 57-61.
- [18] 王腾飞, 邹良浩, 孙 艳. 非对称连体双塔高层建筑的风荷载分布特征风洞试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(4): 27-32.
- WANG Teng-fei, ZOU Liang-hao, SUN Yan. Wind Tunnel Test Study on Characteristics of Wind Load Distribution of Asymmetric Connected Twin-tower Tall Building[J]. Sichuan Building Science, 2017, 43(4): 27-32.
- [19] 楚晨晖, 王 浩. 超高层建筑复杂塔冠结构的风压分布与等效风荷载[J]. 黑龙江科技大学学报, 2018, 28(4): 471-477.
- CHU Chen-hui, WANG Hao. Wind Pressure Distribution and Equivalent Static Wind Loads of Complex Tower Crown Structure[J]. Journal of Heilongjiang University of Science & Technology, 2018, 28(4): 471-477.
- [20] 白 桦, 胡兆同, 胡庆安. 塔桅结构三维定常风场风洞试验及数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(1): 60-64.
- BAI Hua, HU Zhao-tong, HU Qing-an. Wind Tunnel Test on 3-D Steady Wind Flow Field of Tower Mast Structure and Numerical Simulation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(1): 60-64.