

高层建筑裙房屋面区域行人风环境研究

刘明海¹, 石 芬²

¹天一建设发展有限公司, 河南 郑州

²河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作

收稿日期: 2023年4月4日; 录用日期: 2023年4月13日; 发布日期: 2023年6月16日

摘 要

为了研究高层建筑裙房屋面区域的行人风环境, 进行了一系列风洞试验和数值模拟研究, 分析了不同建筑尺寸参数下的裙房屋面行人风速分布特性。结果表明, 空气流经塔楼后, 在塔楼两侧角部发生分离、绕流, 使塔楼两侧的裙房屋面区域出现较大风速, 且当来流风向与建筑立面呈45度夹角时风速最大。裙房屋面的最大风速和加速区面积随着裙房宽度的增大而增大, 随女儿墙高度的增大而减小。基于以上分析结果, 提出了计算裙房屋面最大风速的经验公式, 可为行人风环境评估提供参考。

关键词

行人风环境, 裙房屋面, 加速比, 数值模拟, 风洞试验

Study on Pedestrian Wind Environment on Podium Roof of High-Rise Building

Minghai Liu¹, Fen Shi²

¹Tianyi Construction Co., Ltd., Zhengzhou Henan

²School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan

Received: Apr. 4th, 2023; accepted: Apr. 13th, 2023; published: Jun. 16th, 2023

Abstract

In order to study the pedestrian wind environment on podium roof of high-rise building, a series of wind tunnel tests and numerical simulations were carried out. The distribution characteristics of pedestrian wind speed on podium roof with different building size parameters were analyzed. The results show that the around flow effect will cause significant speed-up effect on both sides of the tall building, resulting in pedestrian wind speed on these areas is relatively large. The pedestrian wind speed is the largest when the angle between the incoming wind and the building fa-

cade is 45° . The maximum wind speed and the speed-up area on the podium roof increase with the width of the podium, and decrease with the height of the parapet wall. The above analysis results lead to the proposal of the empirical formula of maximum wind speed, which can provide reference for the assessment of pedestrian wind environment.

Keywords

Pedestrian Wind Environment, Podium Roof, Speed-Up Ratio, Numerical Simulation, Wind Tunnel Test

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着城市化进程的发展,高层建筑日益增多,相关行人风环境问题更为突出。高层建筑行人区域的局部强风可能使行人行走活动困难,甚至造成行人被吹倒跌伤等安全事故。“峡谷风”、“绕流风”等城市局部强风是当今城市所面临的典型城市灾害之一。

诸多国内外学者针对建筑周围行人风环境特性进行了大量的有益研究,并形成了一些风环境评价方法[1]-[9]。总结而言,既有研究主要是针对地面区域行人风环境展开的,而地面以上区域的行人风环境研究相对匮乏。近年来,很多高层建筑设置了高空露台、外廊、上人屋面等地面以上的露天行人区域,以营造更多的室外活动空间。根据平均风速剖面的沿高增长特性,高空区域的来流风速更大,造成的风环境问题可能更为突出。鉴于此,本文对不同建筑尺寸下的裙房屋面行人高度处的风速分布特性展开研究,以期对相关风环境评估提供参考。

2. 数值模拟概况

本文以典型方形断面高层建筑为研究对象。简化的基准建筑模型如图1所示,高240米,塔楼宽40米,裙房宽160米,裙房高度20米。数值模拟的工况如表1所示,表中工况1~6是为了考察风向角的影响,工况7~19是为了考察裙房高度的影响,工况20~30是为了考察裙房宽度的影响,工况31~43是为了考察裙房女儿墙高度的影响。

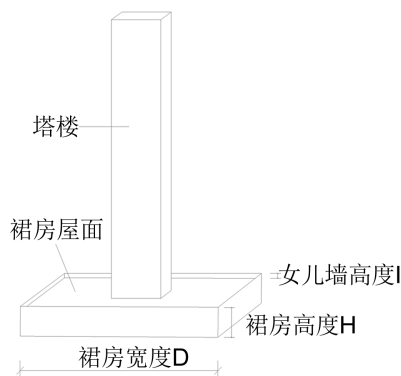


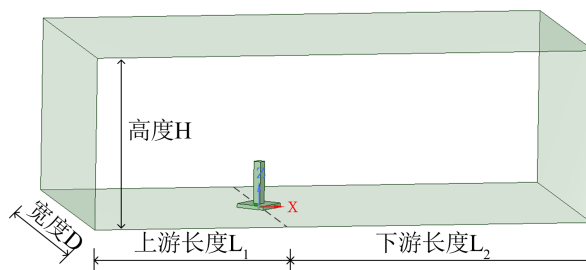
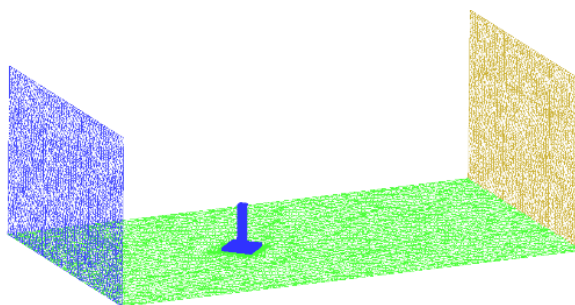
Figure 1. Standard building model

图1. 基准建筑模型

Table 1. Simulation conditions for wind environment of podium roof**表 1.** 裙房屋面风环境数值模拟工况表

工况	定量	变量
1~6	裙房宽 160 m 裙房高 20 m	风向角: 0 度、10 度、20 度、30 度、40 度、45 度
7~19	裙房宽 160 m	裙房高: 12 m、14 m、16 m、18 m、20 m、22 m、24 m、 26 m、28 m、30 m、32 m、34 m、36 m
20~30	裙房高 20 m	裙房宽/塔楼宽: 2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、5.5、6、6.5、7
31~43	裙房宽 160 m 裙房高 20 m	女儿墙高: 0 m、0.5 m、1 m、1.5 m、2 m、2.5 m、3 m、 3.5 m、4 m、4.5 m、5 m、5.5 m、6 m

计算域的尺寸设置对数值模拟结果精度影响较大, 考虑气流发展空间和阻塞比的要求, 计算域尺寸取为 $H \times D \times L = 800 \text{ m} \times 1000 \text{ m} \times 2500 \text{ m}$, 计算域设置如图 2 所示。考虑网格划分形式对数值模拟结果的影响, 首先验证网格划分形式的无关性, 随着网格的不断细化, 数值模拟结果不再发生改变或者变化幅度在允许范围内。本文采用适应性强的四面体网格(见图 3), 部分区域进行网格加密, 加密区域的最大网格尺寸为 0.5 m, 总网格数约为 500 万。

**Figure 2.** The set of calculate area**图 2.** 计算域设置**Figure 3.** Building model meshing**图 3.** 建筑模型网格划分

地面粗糙度类别选择为 C 类, 入口边界条件采用速度入口边界条件。平均风剖面采用《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)规定的指数形式:

$$U = U_0 \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中, U 为不同高度风速, Z_0 为参考点高度, U_0 为参考点风速; α 为地面粗糙度指数, C 类地貌取 0.22。

湍流强度 I 和积分尺度 L_u 的计算公式分别为:

$$I = \begin{cases} 0.31 & Z \leq 5 \\ 0.1 \times \left(\frac{Z}{450}\right)^{-0.25} & 5 < Z \leq 450 \end{cases} \quad (2)$$

$$L_u = \begin{cases} 100 & Z \leq 30 \text{ m} \\ 100 \times \left(\frac{Z}{30}\right)^{0.5} & 5 \text{ m} < Z \leq 450 \text{ m} \end{cases} \quad (3)$$

湍动能 k 公式:

$$k = \frac{3}{2} \cdot (UI)^2 \quad (4)$$

湍流耗散率 ε 如式:

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_u} \quad (5)$$

式中, C_μ 经验常数取 0.09。

以上风速剖面、湍动能 k 和湍流耗散率 ε 等入口边界条件通过编写自定义函数(UDF)实现。计算域出流条件设置为自由出口(outflow), 计算域顶面和两个侧面采用对称边界条件(symmetry), 模型表面和计算域底面采用无滑移的壁面条件(wall)。采用 Realizable k - ε 模型对湍流进行模拟, 求解方式为基于压力求解器(Pressure-Based)的方式, 求解模态选择稳态求解(Steady), 选用 SIMPLE 算法求解。考虑收敛性和模拟精度, 选用二阶离散格式, 判断计算收敛的标准为各变量的无量纲残差小于 1×10^{-4} 且保持稳定。以工况 1 的结果为例, 残差收敛曲线如图 4 所示。

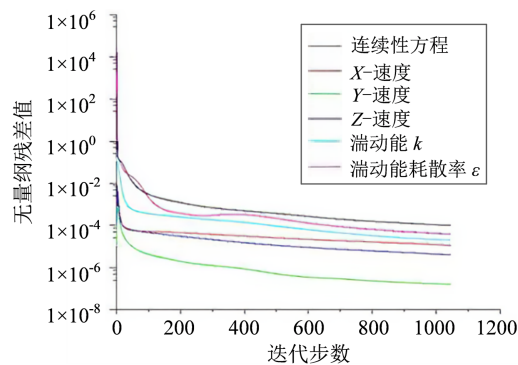


Figure 4. Residual convergence of CFD

图 4. 数值模拟残差收敛曲线

3. 数值模拟结果分析

3.1. 风速比和加速比的定义

在进行风环境评估时, 业界常用方法之一是采用平均风速比作为评价标准, 计算公式为:

$$R = \frac{V_r}{V_0} \quad (6)$$

式中, V_r 为监测区域的平均风速(m/s); V_0 为当地标准地貌 10 m 高度处的平均风速(m/s)。

为了使研究结果具有一般适用性, 本文采用加速比的概念来衡量风速分布情况, 其定义为:

$$R_{\infty} = \frac{V_r}{V_{\infty}} \quad (7)$$

式中, V_{∞} 为监测区域所在高度的来流平均风速(m/s)。

加速比与风速比本质含义一致, 仅参考点高度不同。加速比的参考点高度与监测区域高度相同, 故而加速比与来流风速大小、地面粗糙度、裙房高度都无关, 这样便于建立具有普适性的经验公式。在实际应用时, 可结合当地实际风剖面 and 监测区域的实际高度, 将加速比换算为风速比或实际风速值, 再进行风环境评价。

为定量分析建筑行人区域的加速区范围, 本文将加速比大于 1 的区域称为加速区, 将加速区占总面积的比例定义为面积比, 即:

$$\eta = \frac{A_1}{A} \quad (8)$$

式中, A_1 为加速比大于 1 的区域面积, A 为行人区域总面积。

3.2. 风向角的影响

为分析来流风向对风环境的影响, 首先进行不同风向角的数值模拟, 风向角定义如图 5 所示。

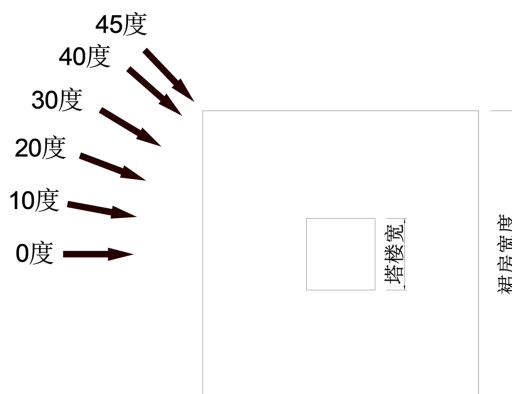
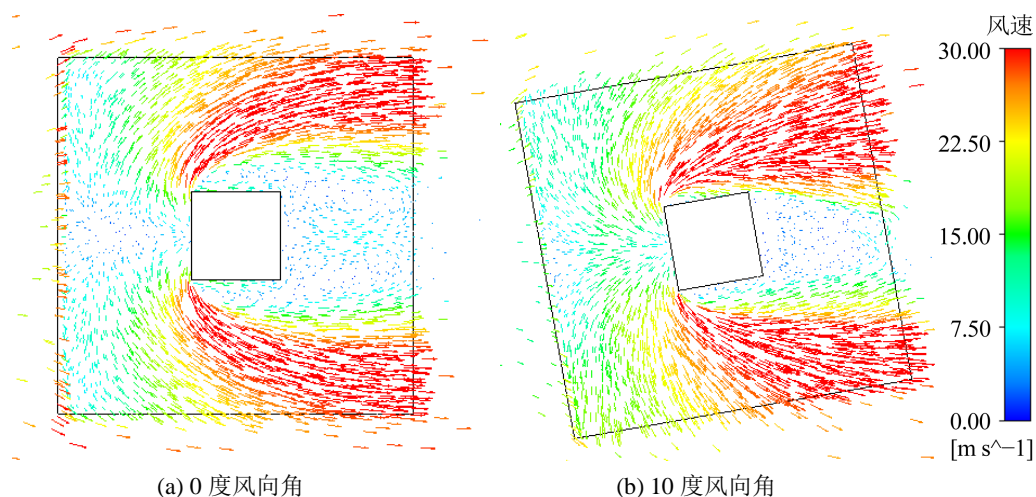


Figure 5. Definition of wind direction angle
图 5. 风向角示意图



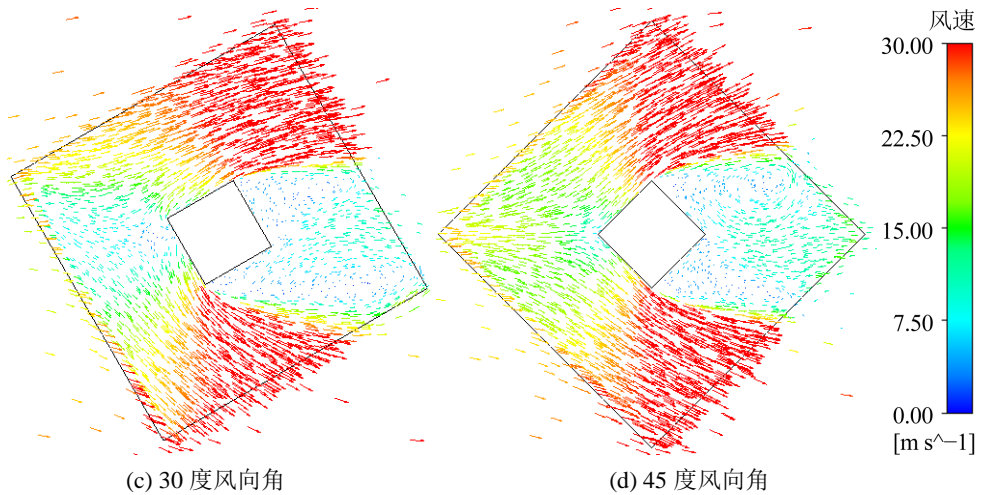


Figure 6. Pedestrian height velocity under typical wind directions
图 6. 典型风向角下行人高度速度云图

图 6 为部分风向角下屋面区域行人高度处的风速分布情况, 据此可以计算出不同位置的加速比(见图 7)。从图 6~7 可以看出, 不论何种风向角, 气流均在建筑塔楼两侧拐角处发生分离, 使得塔楼两侧绕流区域的风速最大, 下游背风区域最小, 上游迎风区域次之。

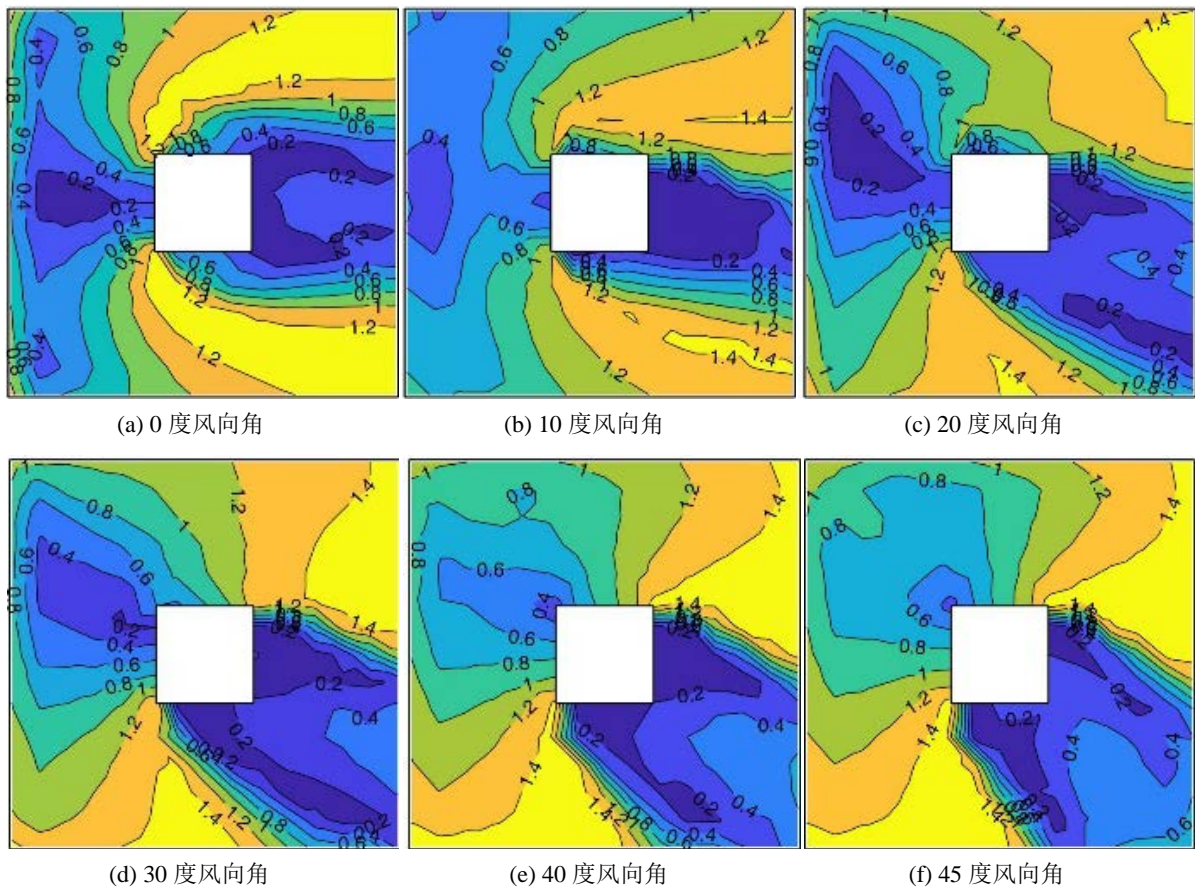


Figure 7. Speed-up ratio under different wind directions
图 7. 不同风向角下加速比云图

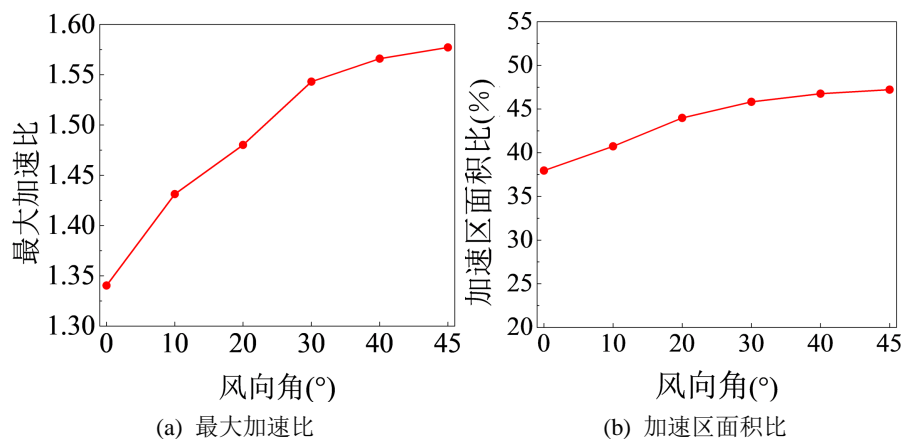


Figure 8. Max speed-up ratio and area ratio under different wind direction
图 8. 不同风向角下的最大加速比和加速区面积比

各风向角的裙房屋面最大加速比如图 8(a)所示, 加速区面积比如图 8(b)所示。从图 8 的结果可以看出, 在 0 度风向角下, 裙房屋面行人高度处的加速比均小于 1.35, 加速比大于 1 的区域占 38%。随着风向角从 0 度到 45 度变化, 裙房屋面行人高度处的最大加速比和加速区面积比逐渐增大, 至 45 度达到最大, 分别接近 1.58 和 48%。

基于上述分析, 下文研究工况仅考虑 45 度最不利风向角。

3.3. 裙房高度的影响

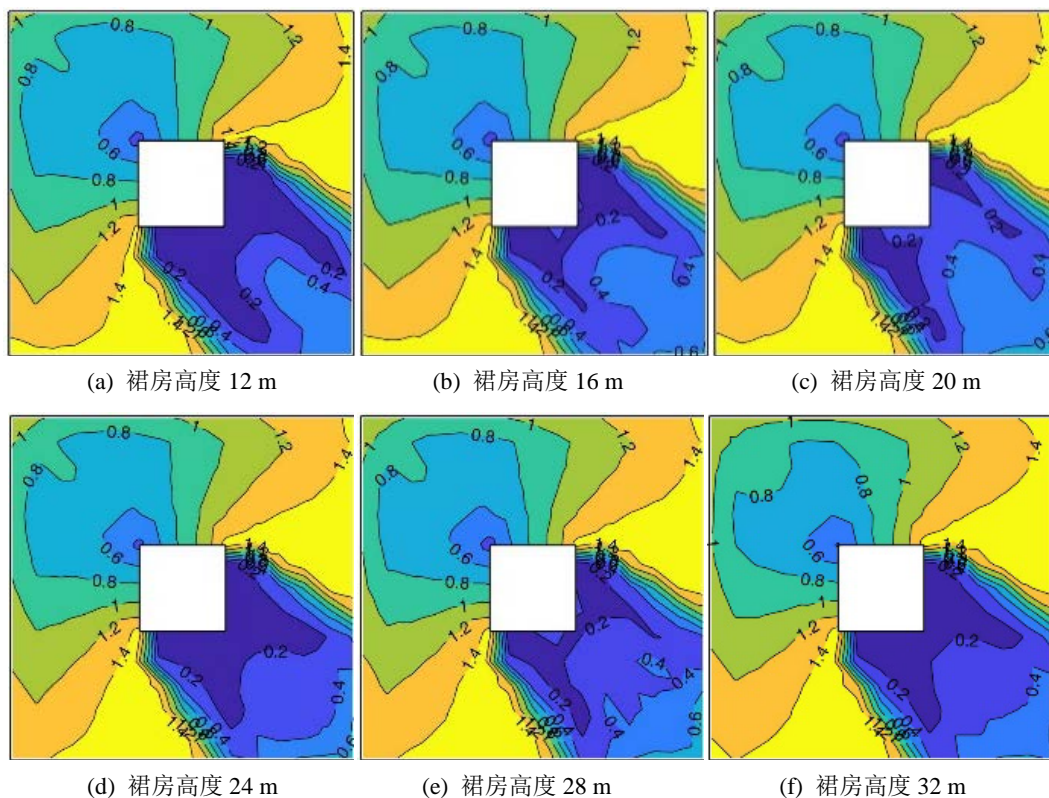


Figure 9. Speed-up ratio with different podium height
图 9. 不同裙房高度的加速比云图

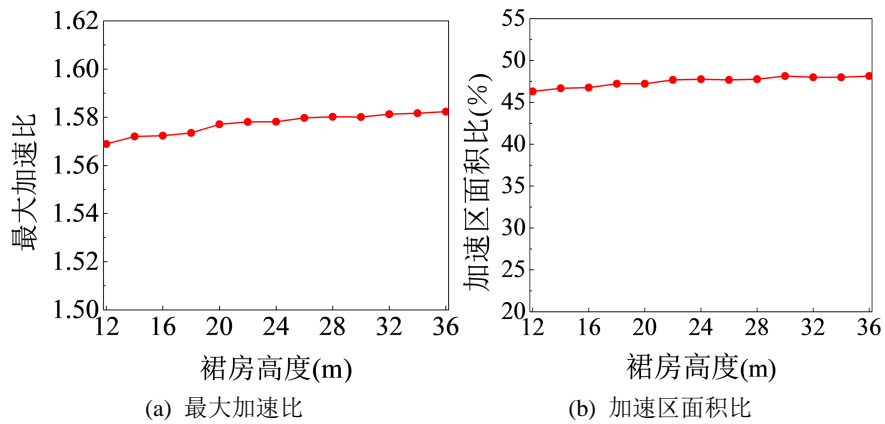


Figure 10. Max speed-up ratio and area ratio with different podium height
图 10. 不同裙房高度下的最大加速比和加速区面积比

为研究裙房高度的影响, 将裙房宽度、塔楼高度和塔楼宽度分别定为 160 m、240 m 和 40 m, 只改变裙房高度(12 m、14 m、16 m、18 m、20 m、22 m、24 m、26 m、28 m、30 m、32 m、34 m、36 m)。为节约篇幅, 不再给出风速矢量云图。图 9 为部分工况下的裙房屋面加速比云图, 图 10 为不同裙房高度下裙房屋面最大加速比和加速区面积比。由图 9~10 可知, 随着裙房高度的增加, 裙房屋面行人高度处各区域加速比几乎不变, 变化幅度在 2% 以内。这一结果也是一种必然, 也说明了本数值模拟结果的可靠性, 因为本文加速比的定义是以监测区域高度处的来流风速作为参考风速, 加速比与裙房高度无关。

3.4. 裙房宽度的影响

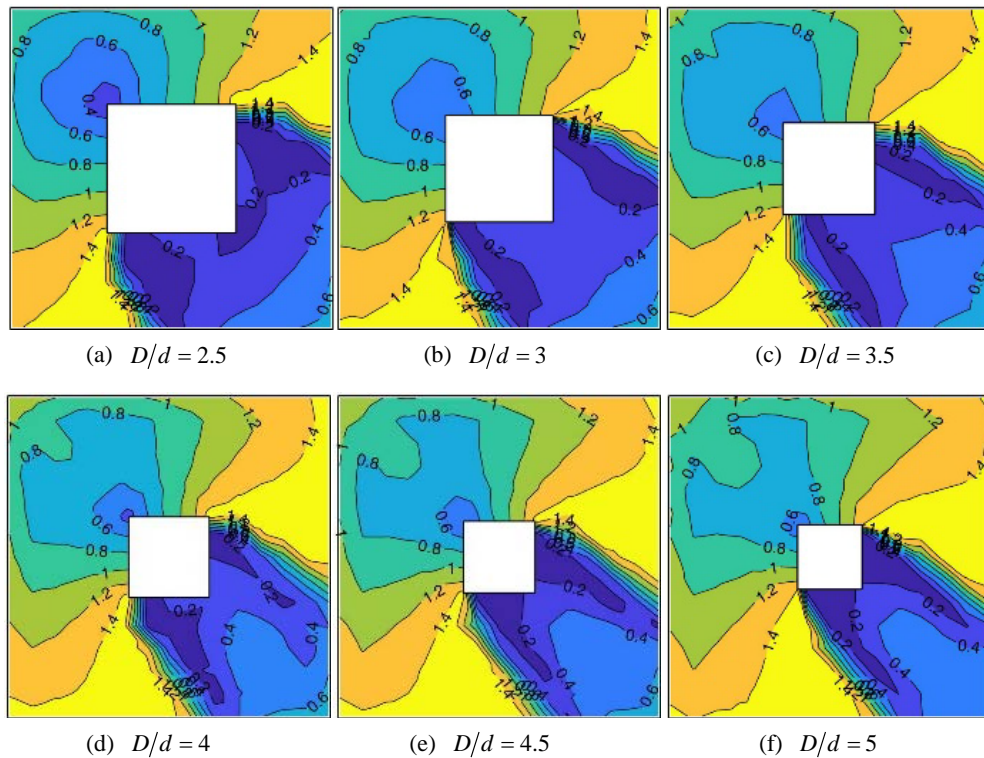


Figure 11. Speed-up ratio with different podium width
图 11. 不同裙房宽/塔楼宽(D/d)加速比云图

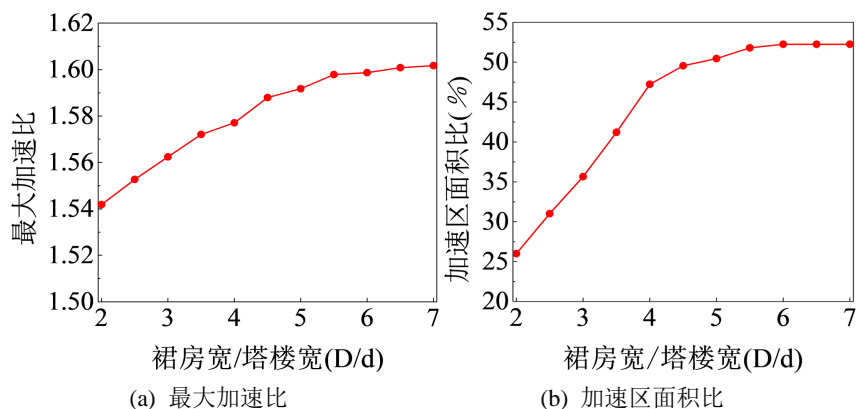


Figure 12. Max speed-up ratio and area ratio with different podium width
图 12. 不同裙房宽度下的最大加速比和加速区面积比

为研究裙房宽度的影响, 将裙房高度、塔楼高度和塔楼宽度分别定为 20 m、240 m 和 40 m, 只改变裙房宽度(裙房和塔楼宽度的比值为 2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、5.5、6、6.5、7)。图 11 为部分工况下的加速比云图, 图 12 为不同裙房宽度下裙房屋面最大加速比和加速区域面积比。由图 11 和图 12 可知, 裙房屋面行人高度处的加速区面积比随着裙房宽度的增加逐渐增大, 当裙房宽度达到塔楼宽度的 4 倍时, 加速比和加速区域面积比几乎不再增大。产生以上现象原因为, 当裙房宽度较小时, 塔楼对来流风的遮挡效应显著, 当裙房宽度增大到一定程度后, 塔楼对气流的遮挡作用不再增强, 即最大加速比和加速区面积比保持稳定。

3.5. 女儿墙高度的影响

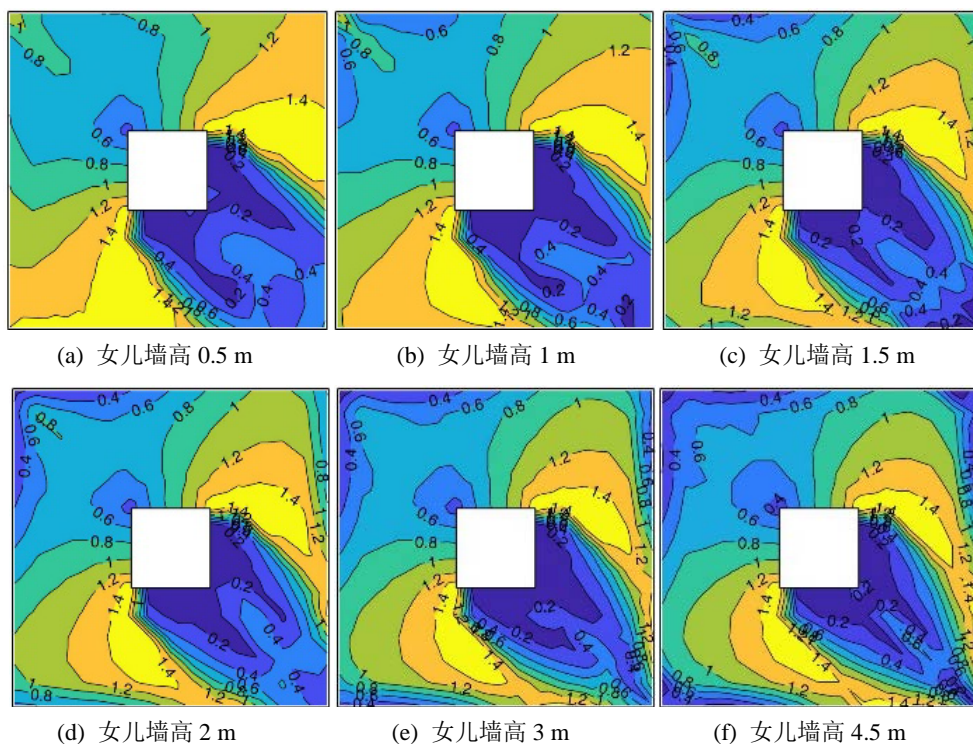


Figure 13. Speed-up ratio with different parapet wall
图 13. 不同女儿墙高度的加速比云图

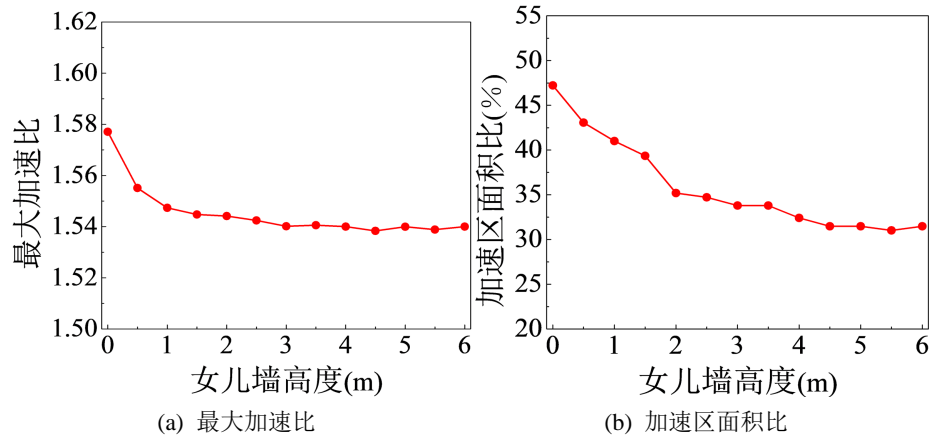


Figure 14. Max speed-up ratio and area ratio with different parapet wall
图 14. 不同女儿墙高度最大加速比和加速区面积比

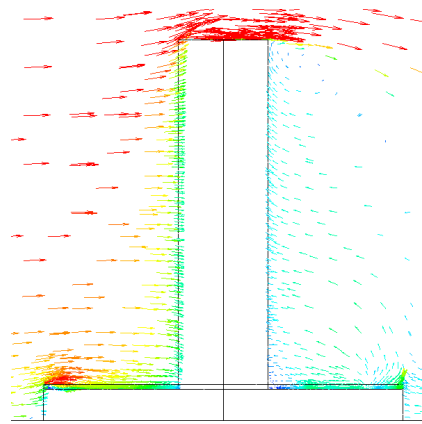


Figure 15. 3D wind speed vector (parapet wall height 3 m)
图 15. 三维风速矢量图(女儿墙高 3 m)

为女儿墙高度的影响, 将裙房和塔楼尺寸保持不变, 只改变裙房女儿墙高度(0 m、0.5 m、1 m、1.5 m、2 m、2.5 m、3 m、3.5 m、4 m、4.5 m、5 m、5.5 m、6 m)。图 13 为不同女儿墙高度下的裙房屋面加速比云图(部分工况), 图 14 为最大加速比和加速区域面积比。

由图 13 和图 14 可知, 裙房屋面各区域最大风速比和加速区面积比随着女儿墙高度的增加逐渐减小。当女儿墙高度达到 1.5 m 后, 最大风速比和加速区面积比几乎保持不变。在上游靠近女儿墙的区域, 加速比值随着女儿墙高度的增加而逐渐减小, 而在塔楼下游靠近女儿墙的区域, 则呈现相反的规律。显然, 上述结果和女儿墙的有效遮挡范围有关及三维绕流效应有关(见图 15)。上述分析表明, 当女儿墙高度超过 1.5 米后, 再通过增加女儿墙高度来控制裙房的风环境并不是一个有效的方式, 因为女儿墙的有效遮挡范围是有限的。

4. 最大加速比的经验公式

根据上述不同情况下的数值模拟结果, 提出建筑裙房屋面的最大加速比的经验公式为:

$$R_{\max} = 0.051 \times \ln x_b + 0.039 \times e^{-x_h} + 1.467 \quad (9)$$

式中, x_b 为裙房宽度和塔楼宽度的比值, x_h 为裙房屋面女儿墙高度。

以部分工况为例, 图 16 给出了经验公式与数值结果的对比情况。从图 16 来看, 计算公式能较为准

确的计算出裙房屋面行人高度处的最大加速比。式(9)的加速比与来流风速、地面粗糙度、裙房高度无关,在实际应用时,结合当地实际风剖面 and 监测区域的实际高度将加速比换算为风速比或实际风速值,即可进行风环境评价。当存在建筑群体干扰时,以受干扰后的风速作为来流风速,再结合式(9)即可用于群体建筑中裙房屋面的风环境评价。

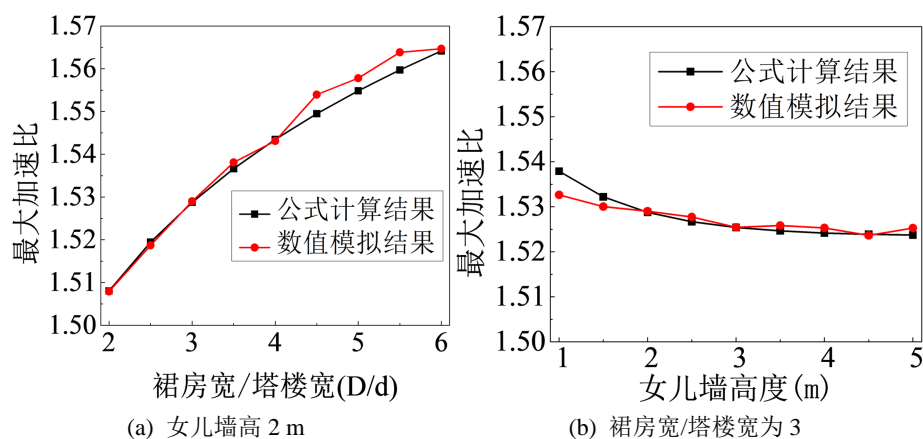


Figure 16. Comparison between CFD results and formula results

图 16. 数值模拟结果与公式结果对比

5. 风洞试验验证

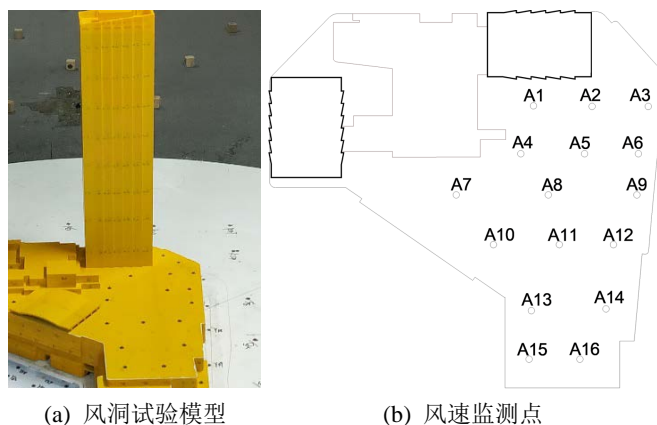


Figure 17. Wind tunnel test model and wind speed monitoring point

图 17. 风洞试验模型及风速监测点布置

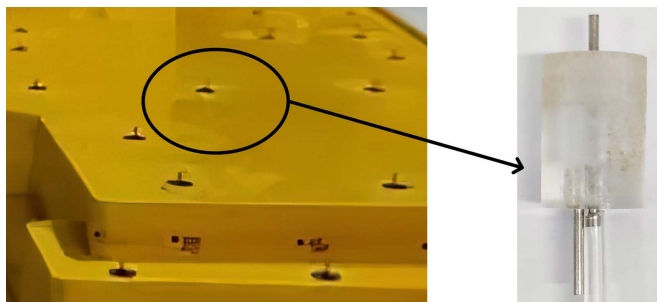


Figure 18. Wind speed monitoring probe

图 18. 风速探头

为了本文检验数值模拟的可靠性, 选择一个与图 1 的基准建筑模型较为接近的实际建筑分别进行风洞试验和数值模拟, 其中数值模拟的参数设置和求解方式等条件与本文的其他研究工况相同。如图 17 所示, 实际建筑的塔楼高度、塔楼宽度和裙房高度均与标准模型相同, 仅裙房形状有所差异。试验在武汉大学 WD-1 边界层风洞试验室中进行, 试验模型的几何缩尺比为 1:300, 裙房屋面共布置 16 个测点, 采用风速探头测量行人高度处风速(图 18)。

图 19 为风洞试验和数值模拟两种方法得到的裙房屋面加速比对比结果。从图 19 可以看出, 数值模拟得到的加速比和风洞试验结果的趋势一致、误差较小(最大误差为 18%), 说明本文所采用的数值模拟方法是可靠的。

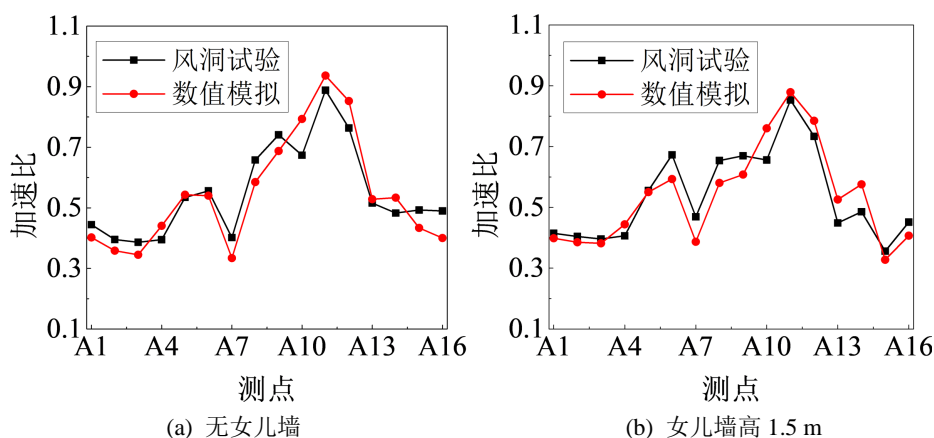


Figure 19. Comparison of wind tunnel test and CFD results

图 19. 风洞试验和数值模拟结果对比

6. 结论

本文主要结论如下:

- 1) 空气流经塔楼后, 在塔楼两侧拐角处发生分离、绕流, 使塔楼两侧绕流区域裙房屋面的风速最大, 塔楼背风区域最小, 上游迎风区域次之。
- 2) 来流风向与建筑立面夹角为 0 度时, 裙房屋面风速的最大加速比和加速区面积相对较小, 随着夹角的增大, 最大加速比和加速区面积逐渐增大, 至 45 度达到最大。
- 3) 随裙房宽度的增加, 裙房屋面行人高度处最大加速比和加速区面积逐渐增大, 当裙房宽度达到塔楼宽度的 4 倍时, 最大加速比和加速区面积几乎不再增大。
- 4) 随着女儿墙高度增加, 裙房屋面各区域最大风速比和加速区面积逐渐减小, 当女儿墙高度超过 1.5 m 后, 最大风速比和加速区面积保持稳定。
- 5) 本文提出的高层建筑裙房屋面最大加速比经验公式与来流风速、地面粗糙度、裙房高度无关, 在实际应用时, 结合当地实际风剖面 and 屋面实际高度将加速比换算为风速比或实际风速值, 即可进行风环境评价。当存在建筑群体干扰时, 以受扰后的风速作为来流风速, 再结合本经验公式即可用于群体建筑中裙房屋面的风环境评价。

参考文献

- [1] He, Y.Y., Liu, Z.X. and Ng, E. (2022) Parametrization of Irregularity of Urban Morphologies for Designing Better Pedestrian Wind Environment in High-Density Cities—A Wind Tunnel Study. *Building and Environment*, 2022, 109692. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109692>

-
- [2] Kubota, T., Miura, M., Tominaga, Y., *et al.* (2008) Wind Tunnel Tests on the Relationship between Building Density and Pedestrian-Level Wind Velocity: Development of Guidelines for Realizing Acceptable Wind Environment in Residential Neighborhoods. *Building and Environment*, **43**, 1699-1708. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.015>
- [3] Tsang, C.W., Kwok, K.C. and Hitchcock, P.A. (2012) Wind Tunnel Study of Pedestrian Level Wind Environment around Tall Buildings: Effects of Building Dimensions, Separation and Podium. *Building and Environment*, **49**, 167-181. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.014>
- [4] 马文勇, 刘庆宽, 刘小兵, 等. 群体高层建筑行人区域风环境试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(B06): 304-308.
- [5] Mittal, H., Sharma, A. and Gairola, A. (2019) Numerical Simulation of Pedestrian Level Wind Flow around Buildings: Effect of Corner Modification and Orientation. *Journal of Building Engineering*, **22**, 314-326. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.12.014>
- [6] Toa, P. and Lam, K.M. (1995) Evaluation of Pedestrian-Level Wind Environment around a Row of Tall Buildings Using a Quartile-Level Wind Speed Descriptor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **54**, 527-541. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)00069-P](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)00069-P)
- [7] Soligo, M.J., Irwin, P.A., Williams, C.J., *et al.* (1998) A Comprehensive Assessment of Pedestrian Comfort Including Thermal Effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **77**, 753-766. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(98\)00189-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00189-5)
- [8] 谢壮宁, 卢瑜, 余先锋. 高层建筑底部区域行人风环境试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(12): 1726-1732.
- [9] Wu, H. and Stathopoulos, T. (1994) Further Experiments on Irwin's Surface Wind Sensor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **53**, 441-452. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)90095-7](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)90095-7)