

龙卷风作用下连续双坡屋面风荷载特性的数值模拟研究

张舒涵, 李方慧, 赵方锐, 寇佳茵, 白 宇

(黑龙江大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:为探究龙卷风作用下连续双坡屋面的风压分布规律,基于计算流体力学数值模拟,采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,研究在 30° 、 45° 、 60° 等不同坡度条件下,涡流比分别为 0.18、0.30、0.50、0.80、1.00、1.50 且放置于龙卷风中心的双坡房屋建筑顶面风压分布。结果表明:1)当建筑物位于龙卷风中心时,屋面风荷载主要表现为吸力;随着坡角增加,最大负压略有下降,约减少 1.5%,双坡屋面风压变化范围较小;2)随着坡角增大,右侧屋脊与双坡中心处易发生漩涡脱落,产生较大的负压,导致双坡屋面中心与右侧出现较大负压;3)随着涡流比增大,连续双坡屋面风压系数绝对值呈现先增后减再增再减的趋势,在涡流比为 0.3 和 1.5 的工况下,分别出现极大值 1.680 与极小值 0.472,数值下降约 72%;4)在低涡流比时,涡核半径较小,屋面风压变化显著;而在高涡流比时,风压等值线差值较小,屋面风压变化较为平缓。

关键词:连续双坡屋面; 龙卷风; 涡流比; 低矮建筑; 数值模拟

中图分类号:TY312⁺.1

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)03-0044-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.03.035

Research on numerical simulation of wind load characteristics of continuous double-slope roof under tornado effect

ZHANG Shuhan, LI Fanghui, ZHAO Fangrui, KOU Jiayin, BAI Yu

(College of Civil Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150086, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to explore the wind pressure distribution of continuous double-slope roofs under tornado, based on numerical simulations of computational fluid dynamics, the wind pressure distribution on the top surface of double-slope buildings under the 30° , 45° , 60° and other different slope conditions with vortex ratios of 0.18, 0.30, 0.50, 0.80, 1.00 and 1.50 placed in the center of the tornado is studied by using the Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model. The results show that: 1) When the building is located in the center of the tornado, the roof wind load is mainly manifested as suction; as the slope angle increases, the maximum negative pressure slightly decreases, which decreases about 1.5%, and the range of changes in the wind pressure on the double slope is small; 2) As the slope angle increases, vortex falls easily at the right ridge and the center of the double slope, resulting in a large negative pressure, resulting in a large negative pressure on the center and the right side of the double slope; 3) As the vortex ratio increases, the absolute value of the continuous double slope roof wind pressure coefficient shows a trend of increasing first and then decreasing, and then decreasing again. Under the operating conditions of vortex ratios of 0.3 and 1.5, the maximum value 1.680 and the minimum value 0.472 respectively appear, with a decrease of about 72%; 4) At low vortex ratio, the vortex core radius is smaller, and the roof wind pressure changes significantly; while at high vortex ratio, the wind pressure contour difference is smaller, and the roof wind pressure changes are relatively gentle.

Key words: continuous double-slope roof; tornado; vortex ratio; low-rise buildings; numerical simulation

收稿日期: 2024-08-27

作者简介: 张舒涵(2000—),女,硕士研究生,从事结构风工程方面的研究。

通信作者: 李方慧(1978—),男,教授,从事大跨度钢结构,风雪工程灾害方面的研究。

龙卷风是一种强烈的小范围涡旋, 具有极强的风力但影响范围不大。它往往在瞬间形成, 短时间内席卷整个区域, 产生强劲而狭窄的风力, 一旦出现, 会给社会带来重大损失。2019 年, 辽宁开原遭受龙卷风破坏, 轻钢、砖木和钢筋混凝土结构的建筑都出现了不同程度的损坏^[1]。鉴于龙卷风对建筑造成的破坏性影响, 深入研究龙卷风与建筑结构相互作用的机制, 并提出有效措施来提升建筑结构的抗风性能显得尤为迫切。建筑师和工程师们需要革新现有建筑设计, 采用更加安全、坚固的材料, 并强化建筑结构的抗强风能力, 以减少因龙卷风引起的建筑损毁事故。

目前, 对龙卷风的研究主要采取实地观测、装置试验和数值模拟 3 种方法。其中, 实地观测虽然能够提供直接且精确的数据, 但这种方法面临诸多挑战: 1) 危险性高。龙卷风发生时往往伴随着极端天气条件, 增加了测量的难度和风险。2) 实发性和随机性。由于龙卷风的突发性和随机性特点, 实时捕捉并记录其形态变化是一项艰巨的任务。相比之下, 利用先进的科学仪器进行的龙卷风装置试验显得更为安全和可控。然而, 这种试验也存在一定的局限性, 因为它们无法完全复制自然情况下的龙卷风活动。数值模拟作为一种不受地理位置限制的研究手段, 已经逐渐成为国内外研究者广泛采用的方法之一。随着计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 理论不断进步和计算机技术的快速发展, 数值模拟技术已经能够模拟出更接近真实情况的龙卷风场。

近年来, 国内外研究者致力于提高建筑结构性能, 特别是在龙卷风等极端天气条件下。通过运用先进技术手段, 如数值模拟和模型试验等, 研究者们对龙卷风下的建筑性能进行了深入探索。如: 王新等^[2]模拟了龙卷风动态冲击高层建筑结构的动态过程, 发现高层建筑荷载效应与建筑尺度有关; LIU 等^[3]研究了双坡屋面在龙卷风作用下的低矮建筑风荷载特性, 提出了一种利用直线风洞估算龙卷风诱发平均空气动力的方法; 王辉等^[4]分析了龙卷风作用下有、无挑檐的低矮建筑表面风压分布规律; 汤卓等^[5]开展了针对双坡屋面刚性模型的风塔测压试验, 揭示了径向距离与

双坡屋面风压分布之间的关联规律。上述研究涵盖了不同类型的建筑屋面设计, 包括常见的高层建筑和低矮双坡屋面等多种形式; 然而, 这些研究并未深入探讨涡流比、结构形态变化等对龙卷风模拟风荷载因素的影响。本文以改进的龙卷风模型为基础, 采用 CFD 数值模拟方法, 系统地研究了双坡屋面低矮建筑在龙卷风作用下风荷载的变化情况; 考虑了 6 种不同的涡流比 (0.18、0.30、0.50、0.80、1.00、1.50), 并通过选择 3 种具有代表性屋面坡角的建筑坡度 (30°、45°、60°) 进行模型模拟, 旨在深入探究屋面坡角和涡流比对屋面风压分布特性的具体影响机制; 通过精细的数值分析, 揭示出建筑屋面风压的实际分布特性及其随特定因素变化的规律; 此外, 引入涡流比这一变量, 可以进一步讨论风速与湍流强度之间的关系, 以及这种相互作用对风压分布的影响, 以期对结构抗风性能研究提供借鉴。

1 龙卷风数值模拟及验证

Rankine 涡^[6]是一个简化的有核旋涡模型, 具有明确的物理特性和数学表达式, 能够更直观地解释旋涡流动现象的物理机理, 从而简化计算复杂度。作为流体力学领域的一个经典模型, Rankine 涡经过了多年的研究和发展, 为其在实际应用中的可靠性和稳定性奠定了坚实的基础。其数学表达式:

$$\nu = \begin{cases} \nu_{\max} \frac{r}{r_c}, & 0 \leq r \leq r_c \\ \nu_{\max} \left(\frac{r_c}{r} \right)^\varphi, & r_c \leq r \end{cases} \quad (1)$$

式中: ν_{\max} 为最大切向速度, m/s; r 为半径, m; r_c 为涡核半径, m; ν 为风速, m/s; φ 为速度变化率指数, 取 0.7。

1.1 湍流模型及控制方程

采用可实现的 Realizable $k - \varepsilon$ 模型进行数值模拟运算。该模型的湍动能及湍流耗散率的运输方程分别为

$$\frac{\alpha(\rho k)}{at} + \frac{(\alpha(\rho k u_i))}{\alpha x_i} = \frac{\alpha}{\alpha x_j} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa}) \frac{\alpha}{\alpha x_j}] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2)$$

$$\frac{\alpha(\rho\varepsilon)}{\alpha t} + \frac{(\alpha(\rho\varepsilon u_i))}{\alpha x_i} = \frac{\alpha}{\alpha x_j} [(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\alpha\varepsilon}{\alpha x_j}] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{K + (V\varepsilon)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

式中： ρ 为空气密度， kg/m^3 ； k 为湍动能， m^2/s^2 ； t 为时间， s ； u_i 为 i 方向流体的黏度系数， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； x_i 、 x_j 分别为 i 、 j 方向坐标， m ； μ_1 为湍动能黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； σ_k 为湍动能的湍流普朗特数，取 1.0； G_k 为平均速度梯度引起的湍动能， m^2/s^2 ； ε 为湍动能耗散率， m^2/s^2 ； σ_ε 为湍动能耗散率的湍流普朗特数，取 1.2； C_1 为常量，取 $C_1 = \max(0.43, \frac{\mu}{\mu+5})$ ； E 为湍流能量， m^3/s^2 ； C_2 为常量，取 1.9； K 为湍动能， m^2/s^2 ； V 为运动黏度， m^2/s ； μ 为平均应变率张量的模量，计算公式如下。

$$\mu = \sqrt{2E_{ij} \frac{k}{\varepsilon}} \quad (4)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} (\frac{\alpha v_i}{\alpha v_i} + \frac{\alpha v_j}{\alpha v_j}) \quad (5)$$

式中： E_{ij} 为时均应变率， $1/\text{s}$ ； v_i 、 v_j 分别为流体速度在 x 、 y 方向上的分量， m/s 。

1.2 风场模型及边界条件

为了开展龙卷风场模拟，根据 Ward 型^[7]龙卷风模拟器的物理尺寸建立相应的数值模型。风场建模与网格划分策略如图 1 所示。在龙卷风数值模型中，采用非结构化网格划分方法，重点研究龙卷风对地面建筑物的影响。以龙卷风中心建筑为研究对象，对其及其周围区域进行网格加密处理，总网格数量为 280 万个。具体网格划分情况如图 1 所示，模拟器的边界条件设置与尺寸如表 1 所示。

表 1 边界条件设置及尺寸

入口	出口	地面	侧壁面	模型表面	入流		对流	
					高度/m	半径/m	高度/m	半径/m
速度入口	压力出口	无滑移壁面	对称面	无滑移壁面	2.00	5.1	3.96	2.0

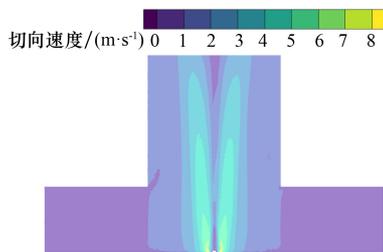
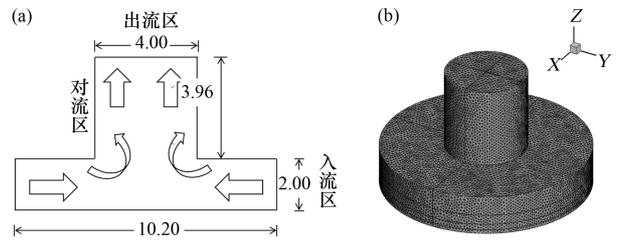


图 2 切向速度轴向分布



(a) 龙卷风模拟器尺寸；(b) 龙卷风模拟器网格划分

图 1 龙卷风模拟器尺寸及网格划分示意

1.3 模型数据验证与计算分析

在无建筑物的环境下，对龙卷风风场进行模拟，并通过对比分析无量纲化处理后的切向速度数据，验证该模拟结果的准确性和可靠性。竖向剖开龙卷风风场模型后，剖断面的切向速度云图如图 2 所示。由图 2 可知：龙卷风风场的切向速度最大值位于风场中心，并以涡核半径为中心对称分布。图 3 为 0.2 m 高度处的切向风速分布云图。由图 3 可知：涡旋中心区域的切向风速接近 0，随后沿半径方向向外扩展时，切向风速急剧增加，在核心半径位置达到峰值。越过核心半径后，随着半径的进一步增大，切向风速逐渐减缓，这一变化趋势与龙卷风典型的风速分布特征相符。

在不同高度处的切向风速及 Rankine 涡模型的计算结果如图 4 所示，其中 Z 为入流区不同高度， m 。由图 4 可知：随着核心半径的增加，切向速度先增大，在核心半径为 1 m 时达到峰值，之后随着核心半径的继续增大而减小。数值模拟结果显示，切向速度的分布模式与 Rankine 涡模型的预测结果以及与本文所用龙卷风涡核模型相同的风洞试验模型结果^[8]展现的趋势一致，这一致性有力地验证了模拟方法的可靠性和准确性。

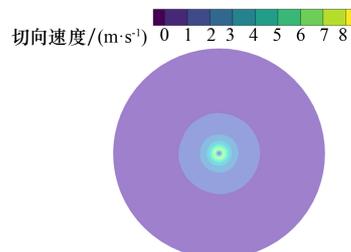
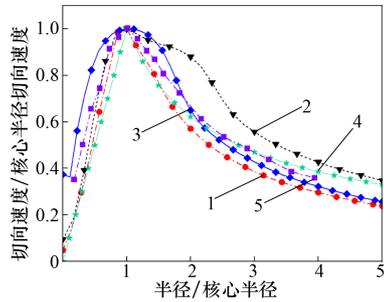


图 3 切向速度水平截面



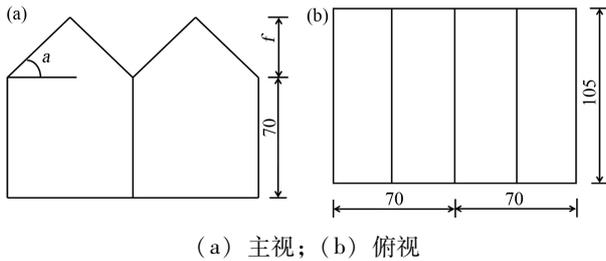
1— $Z=0.2$; 2— $Z=0.5$; 3— $Z=1.0$ 。

4—Rankine 涡模型; 5—Razvai 风洞试验^[10]

图 4 切向速度与实验数据的比较曲线

2 仿真模拟数据解析

连续双坡屋面建筑模型尺寸如图 5 所示, 采用刚性材料按 1:100 的比例缩尺建模。该建筑模型长度为 105 mm, 宽度为 70 mm, 高度为 70 mm, 坡角 α 分别设置为 30° 、 45° 和 60° 。图 6 为模拟龙卷风正面袭击房屋的情形, 将双坡房屋模型置于风场模拟计算域中心, 并对中心区域进行网格加密处理, 具体网格划分如图 7 所示。



(a) 主视; (b) 俯视

图 5 45° 连续双坡建筑模型

mm

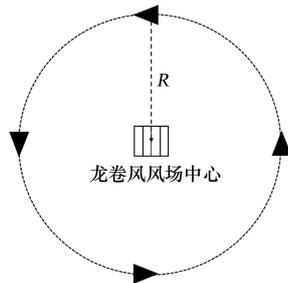


图 6 建筑方位示意

m

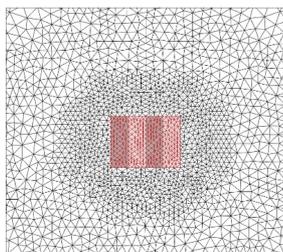


图 7 中心加密网格

为了量化描述建筑表面所承受的风压, 引入无量纲化的风压系数 C_p , 该系数定义为

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{0.5\rho v_{max}^2} \quad (6)$$

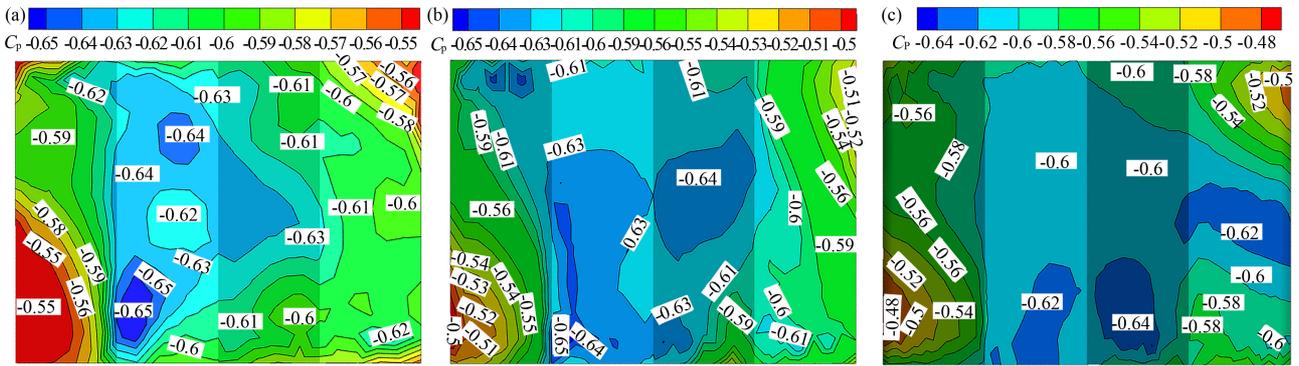
式中: P 为测点风压, Pa; P_{ref} 为参考点静压, 本文取标准大气压; v_{max} 为最大切向速度, m/s。

2.1 屋面坡角对屋面风压系数影响

为了研究双坡屋面在不同坡角情况下的风压场分布, 分别选择 30° 、 45° 、 60° 坡角下的双坡屋面, 在涡流比为 0.18 条件下的风压云图进行比较分析, 云图结果如图 8 所示。由图 8 可知: 双坡屋面整体的风压系数主要表现为负值, 表明屋面风荷载形式为风吸力, 这是由龙卷风中心处的气压降低所致。当坡角为 30° 时, 屋面负压最大值为 0.65, 右上檐口与左下檐口处表现出最小负压 0.55, 较最大负压下降约 15.4%; 随着坡角增加到 45° 时, 负压最大值仍为 0.65, 但负压最小值在左下檐口处的影响范围减小, 数值为 0.5, 较最大负压下降约 9.1%; 当坡角为 60° 时, 负压最大值降低到 0.64, 最大负压较之前下降约 1.5%, 影响范围扩大至屋面右侧, 屋面风压系数变化范围为 0.48 ~ 0.64。总体而言, 负压最小值位于檐口处, 压力沿坡面向屋面正脊递增分布, 呈中心对称状态。双坡屋面中心部位的负压值大于檐口处负压值。随着坡角的增加, 负压的最大值变化不大, 但最小值有所变化, 且影响范围夜有所不同。

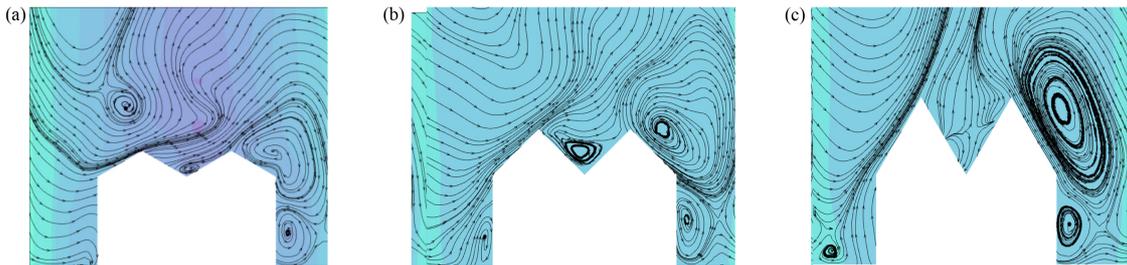
2.2 流场速度迹线横纵对比

为研究双坡屋面绕流流场的特性, 以 30° 、 45° 、 60° 时的坡角为参数, 分别比较双坡屋面在涡流比为 0.18 的风场中纵剖面与横剖面的迹线分布情况, 结果如图 9、10 所示。由图 9 可知: 气流在屋面和侧墙面出现流动分离和漩涡现象。当坡角为 30° 时, 屋面上方存在 3 个分离状态的漩涡, 上方气流出现明显波动; 当坡角增加到 45° 时, 双坡屋面左上方的漩涡强度减小并逐渐消散, 气流分离形成密集的流线; 双坡房屋中心漩涡及右侧坡角上方的漩涡影响范围增大; 当坡角为 60° 时, 双坡房屋中心气流分散, 漩涡消散, 右侧坡角上方的漩涡进一步扩大影响范围。坡角增大会加强气流在双坡中心处的流动分离, 在屋脊背风



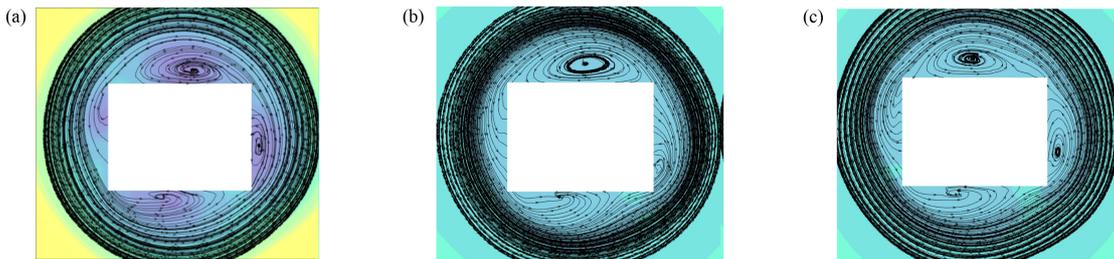
坡角/(°): (a) 30; (b) 45; (c) 60

图 8 不同坡角风压系数等值线



坡角/(°): (a) 30; (b) 45; (c) 60

图 9 不同坡角风速纵剖面云图及迹线



坡角/(°): (a) 30; (b) 45; (c) 60

图 10 不同坡角风速横剖面云图及迹线 (0.07 m 高度处)

面形成漩涡, 导致双坡屋面中心与右侧负压较大。由图 10 可知: 随着坡角的增加, 房屋四周的漩涡数量没有显著变化, 影响范围也基本保持一致, 因此 3 种不同坡角下的屋面负压值范围变化不大。

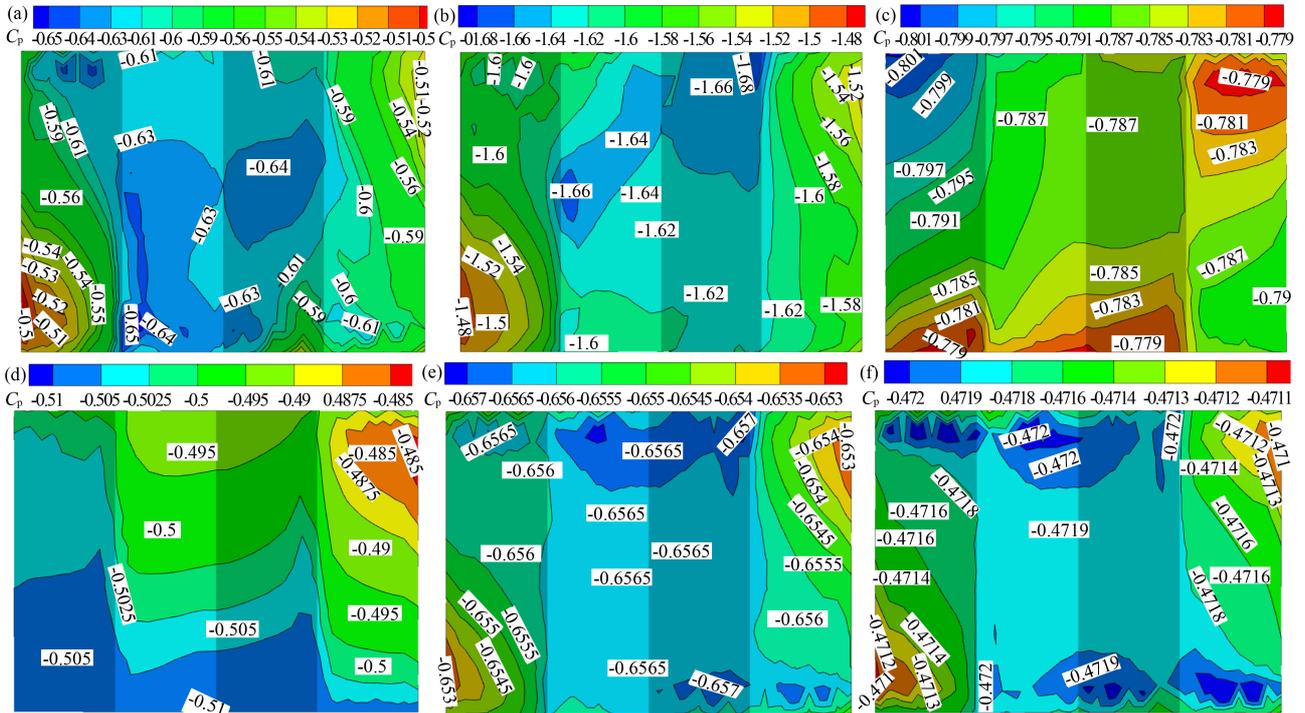
2.3 涡流比与屋面风压系数的关系

涡流比反映了龙卷风涡旋结构的特性, 是衡量旋转强度和径向流动特性的重要参数, 对涡核的大小、形状和旋转强度有显著影响。涡流比 S 定义如下。

$$S = \frac{v_t v_r^{-1}}{2H_0 R_0^{-1}} \quad (7)$$

式中: v_t 为入口速度的切向分量, m/s; v_r 为入口速度的径向分量, m/s; H_0 为入口高度, m; R_0 为气流上升半径, m。

图 11 为坡角为 45° 时, 不同涡流比 (0.18、0.30、0.50、0.80、1.00、1.50) 对双坡屋面风压系数的计算结果。由图 11 可知: 当涡流比较低 (0.18 ~ 0.50) 时, 屋面风压数值相差较为明显, 变化范围较大; 当涡流比较大 (0.80 ~ 1.50) 时, 屋面风压数值的变化幅度较小。当涡流比从 0.18 增大到 0.30 时, 屋面 C_p 绝对值增大, 负压最大值由 0.65 增加到 1.68, 增大约为 1.6 倍; 当涡流比为 0.5 时, 屋面 C_p 变化范围为 0.779 ~ 0.801, 波动范围较小; 当涡流比为 1.5 时, 屋面 C_p 绝对值减小, 负压最大值减小到 0.472, 较最大负压下降约 72%。结果表明, 随涡流比的增加, 涡核半径也相应增加, 但在风场中心, 双坡屋盖表面的风压波动很小。涡核半径越小, 屋盖表面的风压波动越大。



涡流比: (a) 0.18; (b) 0.30; (c) 0.50; (d) 0.80; (e) 1.00; (f) 1.50

图 11 不同涡流比风压系数等值线

3 结论

(1) 建筑物位于龙卷风中心时,屋面风荷载为吸力,并呈中心对称分布。当屋面坡度为 30° 和 45° 时,屋面负压最大值相等;而当坡角为 60° 时,屋面负压最大值降低到 0.64,较前两者下降约 1.5%,风压增加现象不明显。

(2) 随着坡角的增大,双坡屋面中心处易发生漩涡分离,右侧屋脊上方的漩涡会覆盖屋面右侧坡,导致双坡屋面中心与右侧区域的负压较大。

(3) 随着涡流比的增大,双坡屋面 C_p 绝对值呈现先增大、再减小、再增大的变化趋势。涡流比为 0.3 时,屋面负压达到最大值 1.68;当涡流比增大到 1.5 时,屋面负压最小值为 0.472,数值下降约 72%。随着涡流比的增大,涡核半径也相应增大。在低涡流比时,涡核半径较小,屋面风压浮动较大;而在高涡流比时,风压等值线差值较小,此时屋面风压变化较为平缓。

参考文献:

[1] 杨庆山,王雨,回忆,等. 辽宁开原 7·3 龙卷风致结构破坏调研与分析[J]. 建筑结构学报,2023,44(9):

183 - 190.

- [2] 王新,黄生洪,李秋胜. 龙卷风动态冲击高层建筑风荷载数值模拟[J]. 工程力学,2016,33(9):195 - 203.
- [3] LIU Q,ISHIHARA T. A study of tornado induced mean aerodynamic forces on a gable - roofed building by the large eddy simulations [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2015,146:39 - 50.
- [4] 王辉,吴洁颖,李娜,等. 龙卷风作用下四坡屋面建筑风荷载特性数值模拟研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(3):370 - 376;388.
- [5] 汤卓,王兆勇,卓士梅,等. 龙卷风作用下双坡屋面风压分布试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(9):112 - 117.
- [6] LESLIE L M, HOLLAND G J. On the bogussing of tropical cyclones in numerical models: A comparison of vortex profiles [J]. Meteor. Atmos. Phys, 1995, 56(1):101 - 110.
- [7] BAKER G L,CHURCH C R. Measurements of core radii and peak velocities in modeled atmospheric vortices [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1979, 36(12):2413 - 2424.
- [8] RAZAVI A,SARKAR P P. Laboratory investigation of the effects of translation on the near-ground tornado flow field [J]. Wind and Structures,2018,26(3):179 - 190.