

龙卷风作用下拱形屋面风荷载特性数值模拟

朱志峰, 赵方锐, 张舒涵, 刘端宣, 刘育硕

(黑龙江大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:为提升建筑抗风设计的安全性,文章构建了Ward型龙卷风发生装置,运用Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对龙卷风场进行模拟,并针对位于风场中央的拱形屋面低矮建筑进行了风荷载模拟研究。研究过程中,分析了不同矢跨比拱形屋面建筑物的风压分布,并考察了涡流比为0.2、0.5、1.5时,矢跨比为1/10的拱形屋面风压分布规律。结果表明:在静止龙卷风中心,拱形屋面承受负压,风压分布呈中心对称;矢跨比增加对风压增大的影响不显著;顶部中央漩涡分离并向两侧屋檐转移,屋面漩涡数量减少;随着涡流比增加,屋面风压呈现先增大后减小的趋势,为低矮建筑的抗风设计提供了参考。

关键词:风压系数; 龙卷风; 拱形屋面; 低矮建筑; 涡流比; 数值模拟

中图分类号: TU973+.23

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)08-0015-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.08.099

Numerical simulation of wind load characteristics of arch roof under tornado effect

ZHU Zhifeng, ZHAO Fangrui, ZHANG Shuhan, LIU Duanxuan, LIU Yushuo

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

Abstract: In order to enhance the safety of wind resistant design of buildings in this paper, based on the numerical simulation of Computational Fluid Dynamics (CFD), a Ward-type tornado generator is established, and the Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model is used to simulate the tornado field, and the simulation study is conducted to investigate the wind loads on the arch-roofed low-rise building located in the center of the tornado wind field. The wind pressure distribution of arch roof buildings with different sagittal span ratios was analyzed, and the wind pressure distribution law of the arch roof with sagittal span ratio of 1/10 is investigated under vortex ratios of 0.2, 0.5, and 1.5. The results show that: when the building is located in the center of the stationary tornado, the arch roof is subjected to negative pressure under the action of the tornado, and the wind pressure is centrosymmetrically distributed; with the increase of the vector-span ratio the increase of wind pressure on the arch roof is not obvious; at the same time, the vortex in the center of the top of the building separates and transfers to the eaves of the two sides, and the number of vortices on the roof decreases; with the increase of the vortex ratio, the wind pressure on the roof of the arch low-rise building in the central part of the tornado wind field increases firstly and then decrease.

Key words: wind pressure coefficient; numerical simulation; tornado; arch roof; low rise building; vortex ratio; numerical simulation

龙卷风是大气中最猛烈的小尺度大气涡旋,具有极强的破坏力和不可预测性。近年来环境的变化,极端天气现象增多,龙卷风不仅在平原地区或城市郊区出现,也开始在城市环境中频

繁发生。美国长期以来一直受到龙卷风灾害的影响,在我国龙卷风主要发生在沿海城镇地区^[1]。

为了研究龙卷风及其对工程结构的影响,目前主要采用3种方法:现场实测、物理模拟和数

收稿日期: 2023-12-02

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

值模拟。现场实测是通过在实际龙卷风事件中进行观测和数据采集,能够提供真实的观测数据;物理模拟则是利用风洞等实验设备对龙卷风进行模拟研究,可以控制实验条件并获取一些关键参数。基于计算流体力学(CFD)的数值模拟方法,能够通过数学模型和物理方程对龙卷风进行精确的数值计算,模拟其流场特性以及对工程结构的风压分布情况。因具有成本较低、可重复性强等优点,数值模拟逐渐成为研究龙卷风的一种新方法。

通过对龙卷风进行数值模拟研究,可以更好地理解龙卷风与工程结构之间的相互作用,为工程设计和防灾减灾提供科学依据。为了减少龙卷风对建筑结构的破坏,国内外学者常从物理模拟和数值模拟两个角度分析结构受龙卷风风荷载。

物理模拟的方式由简单立方体到复杂结构进行分析,HAAN 等^[2]对单层双坡屋面建筑结构的龙卷风荷载进行了研究;MISHRA 等^[3]和 TAMURA 等^[4]研究了立方体建筑模型上龙卷风荷载和龙卷风的相对距离以及地表粗糙度对立方体模型表面风压的影响;PARTHA 等^[5]则在风洞实验测量了龙卷风作用于低矮建筑上的风荷载;陈旭等^[6]探究了不同龙卷风涡流比条件下冷却塔塔筒内表面风压分布规律,提出了龙卷风作用塔筒内风压分布数学模型。

数值模拟可以研究尺度更大的模型和更复杂的情况,模拟结果与物理模拟结果进行对比可验证可靠性。陈艾荣等^[7]研究了龙卷风作用下的大跨径斜拉桥的响应;LIU^[8]用大涡模拟分析龙卷风对冷却塔作用;王新^[9]对龙卷风动态冲击高层建筑进行模拟。对于低矮建筑屋面 LIU^[10]和王辉^[11]研究了对龙卷风作用下双坡屋面建筑和四坡屋面低矮建筑风荷载特性。

然而,目前对建筑工程中拱形屋盖在龙卷风作用下风压分布特性的数值模拟研究还相对较少。本文基于改进后 Ward 型龙卷风发生装置,采用 CFD 数值模拟方法对位于龙卷风风场中央的拱形屋面低矮建筑展开模拟。通过分析屋面风压系数和风场流线分布,对龙卷风作用下的拱形屋面低矮建筑风压分布进行对比模拟研究,并选取矢跨比为 1/10 的拱形屋面分析涡流比 0.2、0.5、1.5 下建筑物风压分布规律,以期可为同类工程提供参考。

1 龙卷风风场的数值模拟

1.1 湍流模型

为充分反应风场结构和形态的同时,进一步体现旋转流动中流动分离和二次流的现象,本文将湍流模型设置为可实现的(Realizable) $k-\varepsilon$ 模型。该模型的湍动能及湍流耗散率运输方程分别为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + (v + \varepsilon)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

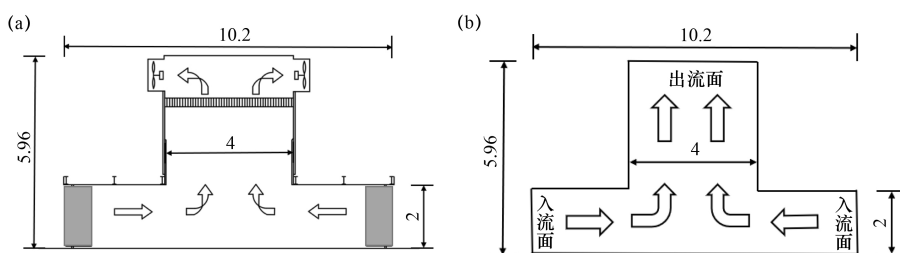
式中: k 为湍动能, J/m^3 ; t 为时间, s ; u_i 为速度分量, m/s ; x_i 和 x_j 为方向向量,表示流体运动方向; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; ε 为湍动能耗散率, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; μ_t 为湍动能黏度, $(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^2$; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能, J/m^3 ; σ_k , σ_ε 分别为湍动能及其耗散率的湍流普朗特数。

其中, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$, $C_2 = 1.9$, $C_1 = \max \left(0.43, \frac{\mu}{(\mu + 5)} \right)$, $\mu = \sqrt{2E_{ij}} \frac{k}{\varepsilon}$, $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ 。

1.2 CFD 几何模型和边界条件

基于德州理工大学改进的 Ward 型龙卷风发生装置 VorTECH^[13]进行相关数值模型的建立,其原型尺寸如图 1(a)所示。同时建立尺寸相符且具有相似发生原理的 CFD 模型,如图 1(b)所示,对流区半径 $R = 2.0 \text{ m}$,入流区 $R = 5.1 \text{ m}$,对流区高度 $H_0 = 3.96 \text{ m}$,入流区高度 $h_0 = 2.0 \text{ m}$ 。

本文中模拟的龙卷风发生装置为上下半径不同的组合柱体,采用非结构化网格方案。由于主要研究龙卷风对近地面建筑作用,对放置于风场中央的建筑物位置四周进行加密,如图 2,最终将流场域划分为图 3 所示的非结构化网格,网格总量为 1.49×10^4 ,最大单元体积为 $4.92 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 。在边界条件设置中,上部出流面设置为压力出口,底部入流面设置为速度入口,坐标系选择柱坐标



(a) VorTECH 原型; (b) 龙卷风发生装置 CFD 模型

图 1 VorTECH 原型和龙卷风发生装置 CFD 模型

m

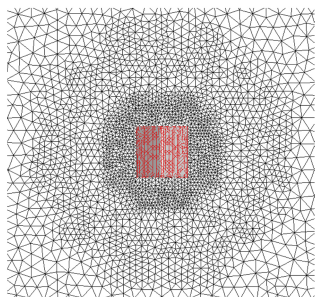


图 2 网格加密

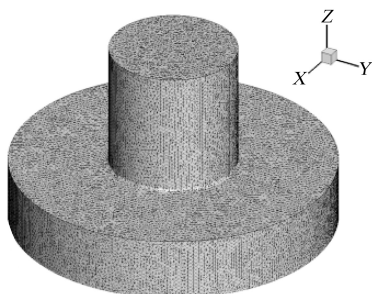


图 3 计算域网格划分

系, 径向速度为 1.08 m/s, 切向速度为 0.43 m/s。

在龙卷风研究中, 对龙卷风流动影响最大的是涡流比 S 、径向雷诺数 R_e 、高宽比 a 这 3 个参数, 在本文模拟中 $S=0.20$, $R_e=5.93 \times 10^5$, $a=1$ 。计算公式如下:

$$a = \frac{h_0}{R} \quad (3)$$

$$S = \frac{\tan \beta}{2a} = \frac{v_0}{2au_0} \quad (4)$$

$$R_e = \frac{Rv_0}{\nu} \quad (5)$$

式中: h_0 为入流高度, m; R 为上升气流半径, m; v_0 为涡核半径 R_e 处切向速度, m/s; u_0 为涡核半径 R_e 处径向速度, m/s; β 为入流角度, ($^\circ$); ν 为空气运动黏性系数, $\nu=1.45 \times 10^{-5}$ m/s。

1.3 风场模拟和验证

本文首先对无建筑物的龙卷风风场模拟, 分

析不同高度处风场无量纲切向速度。再将模拟结果与 Rankine 涡模型和风洞试验模型^[14]的结果对比, 从而验证龙卷风发生装置数值模型的准确性。图 4 为龙卷风模型竖直剖面下切向速度云图, 可以看出从涡中心处到远离涡中心处切向速度先增大后减小, 与龙卷风风速分布特征相符。图 5 可知风场高度 z 为 0.1、0.2、0.3 m 的无量纲化切向速度与风洞试验数据较为吻合, 故本文模拟方法具有较好的可靠性。

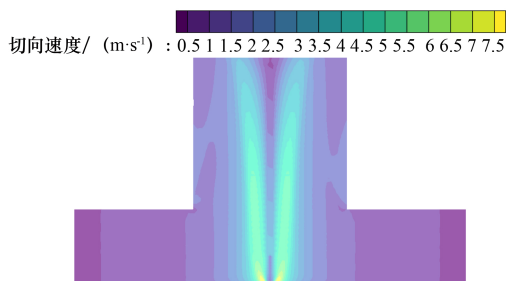
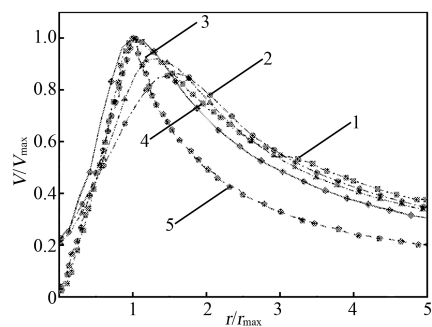


图 4 切向速度分布云图



1—Rankine 涡模型; 2—0.1 m; 3—0.2 m; 4—0.3 m; 5—Razavi 风洞实际^[14]。

图 5 无量纲切向速度沿径向分布曲线

注: r 为无量纲化径向距离; V 为无量纲化切向速度。

2 模拟结果与分析

将建筑物置于龙卷风风场中央, 如图 6 所示, 研究拱形屋面建筑矢跨比和涡流比变化对流场切向风速与屋面风压的影响(封闭建筑仅考虑外表面

风压)。

本文研究的所有低矮建筑模型按 1:100 缩尺比建模,模型平面布置参照风洞试验文献[15]设置:以边长 120 mm 正方形为底面,檐口高度 h 为 80 mm。拱形屋面矢跨比 f/B 设置为 1/10、1/5、1/3,模型示意图如图 7 所示。

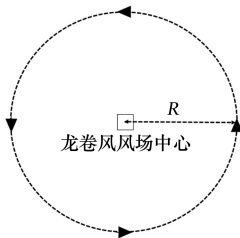
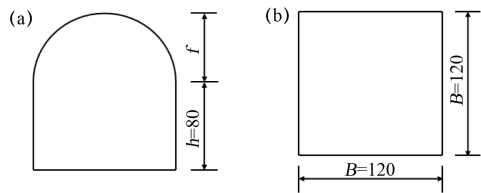


图 6 建筑物方位示意



(a) 主视; (b) 俯视

图 7 模型示意

mm

2.1 不同坡角和矢跨比下风压对比

为了定量反映建筑表面风压分布特征,引入无量纲风压系数来描述建筑表面风压,定义为

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

式中: P 为表压, Pa; P_{ref} 为参考压力,模拟时取 0 Pa; ρ 为空气密度,取 1.225 kg/m^3 ; v_{max} 为未放置建筑时风场中最大切向速度, m/s。

图 8 给出了矢跨比为 1/10、1/5、1/3 拱形屋面的无量纲风压系数云图。可以看出拱形屋面在各矢跨比

下均受负压,屋面风荷载作用形式为风吸力,最大风压集中在拱顶中央,且压力呈中心对称分布。矢跨比为 1/10 时,拱顶中央最大风压数值约为 -0.49 ,檐口处风压较低,其右上角和左下角负压约为 -0.42 ,较最大负压下降约 14.3%。随着矢跨比增加为 1/5,最大风压在 -0.49 左右保持稳定,最小风压缓慢减小为 -0.41 ,下降约 2.4%。当矢跨比为 1/3 时,檐口处所受风吸力继续降低,最小风压下降约 4.9%。

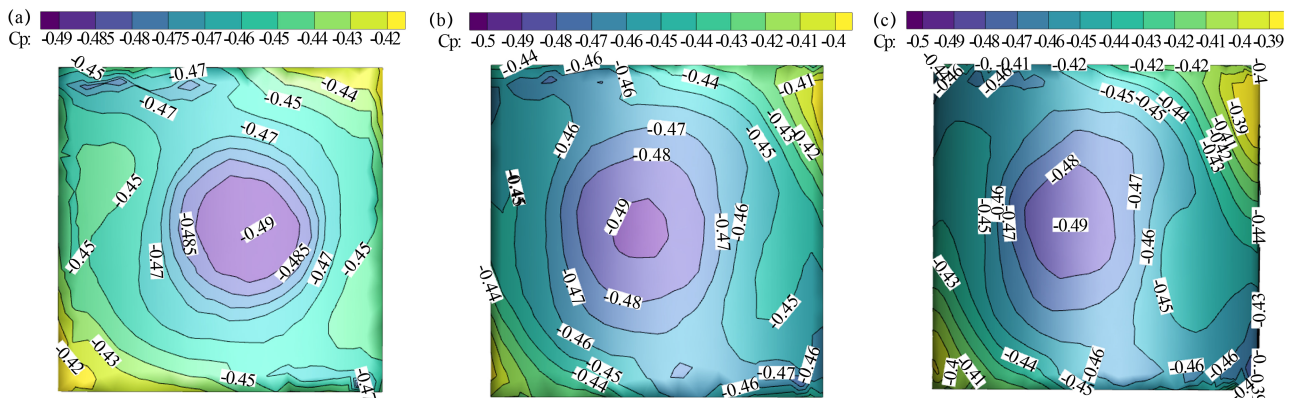
2.2 不同矢跨比下风压流线对比

不同矢跨比拱形屋面竖直中心剖面位置风压流线图如图 9 所示,气流在模型屋面及侧墙出现明显的流动分离和漩涡,这也是导致屋面负压较大的原因。图 9(a) 可知,矢跨比为 1/10 时,屋面上方存在非对称分布的两个漩涡,屋顶中央上方气流发生明显波动,旋涡处于即将分离状态。随着矢跨比增加,如图 9(b) 所示,矢跨比为 1/5 时建筑物顶部中央的漩涡分离,转移至两侧屋檐处,第三个漩涡出现。如图 9(c) 所示,矢跨比为 1/5 时风场结构趋于稳定,旋涡呈对称分布。

2.3 不同涡流比下风压对比

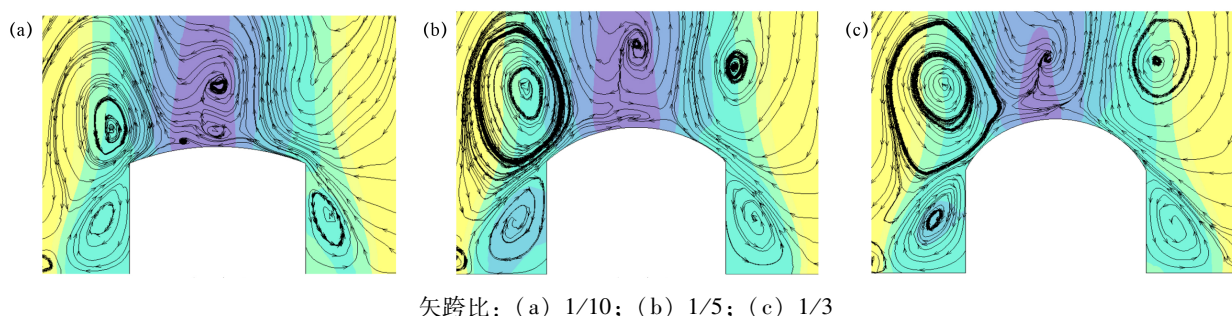
为研究涡流比对低矮建筑的龙卷风荷载影响,考虑到 3 种情况中矢跨比为 1/10 时无量纲风压绝对值最大,即该情况下龙卷风对拱形屋面低矮建筑影响较大。同时,不同涡流比龙卷风风场 v_{max} 不同,计算所得无量纲风压 C_p 无法进行比较。故对不同涡流比下龙卷风风场中心位置中矢跨比为 1/10 的拱形屋面建筑表面风压 P 进行分析,再使用涡量图对机理进一步分析。

图 10 给出了涡流比 (S) 为 0.2、0.5、1.5 下拱



矢跨比: (a) 1/10; (b) 1/5; (c) 1/3

图 8 拱形屋面不同矢跨比 C_p 云图



矢跨比: (a) 1/10; (b) 1/5; (c) 1/3

图 9 不同坡角拱型屋面竖直中心剖面位置风压流线图

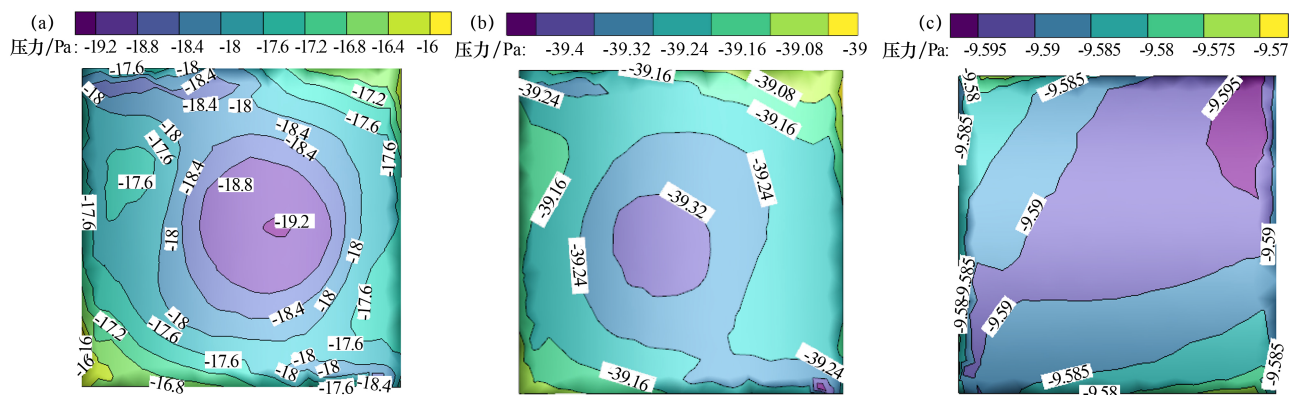
(a) $S=0.2$; (b) $S=0.5$; (c) $S=1.5$

图 10 拱形屋面不同涡流比下压力云图

形屋面风压云图。由图可知,随着涡流比增加,屋面风压均为负压由 -19.2 Pa 先增大至 -39.4 Pa 后减小为 -9.60 Pa 。可能原因: 涡流比为 $0.2 \sim 0.5$ 时,随着涡流比增加,龙卷风涡向近地面聚集,屋面处能量和气压降幅度增加;而涡流比为 $0.5 \sim 1.5$ 时,龙卷风的单核涡结构开始转变为多核涡,涡核中心不再分布在风场中央,屋面风压呈降低趋势。

3 结 论

本文基于龙卷风发生装置数值模拟模型,对位于龙卷风风场中央的拱形屋面低矮建筑风荷载进行模拟。对比分析不同矢跨比下的拱形屋面风压分布特征,并针对矢跨比为 $1/10$ 的拱形屋面分析了不同涡流比下风压分布规律,所得结论如下:

(1) 建筑物位于龙卷风中心时,龙卷风作用下拱形屋面受负压,且风压呈中心对称分布。随着矢跨比增加拱形屋面风压而增加现象不明显。

(2) 随矢跨比增大,拱形屋面最大风压所在位置由中央向左上方和右下方对角移动,建筑物顶部中央的漩涡分离,转移至两侧屋檐处,屋面的漩涡数量减少。

(3) 随着涡流比由 0.2 增加至 0.5 ,龙卷风风场中央拱形低矮建筑屋面风压增大,涡流比由 0.5 增加至 1.5 ,拱形低矮建筑屋面风压呈减小趋势。本文涡流比设置间隔较大,未考虑涡流比微小变化对风压的影响,此部分内容将在后续研究中深入探索。

参考文献:

- [1] 黄大鹏,赵珊珊,高歌,等. 近 30 中国龙卷风灾害特征研究[J]. 暴雨灾害,2016,35(2):97-101.
- [2] HAAN F L, BALARAMUDU V K, SARKAR P P. Tornado-induced wind loads on a low-rise building [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 136(1): 106-116.
- [3] MISHRA A R, JAMES D L, LETCHFORD C W. Physical simulation of a single-celled tornado-like vortex, Part B: Wind loading on a cubical model [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(8-9): 1258-1273.
- [4] TAMURA M Y. Dependence of surface pressures on a cubic building in tornado like flow on building location and ground roughness [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 103: 50-59.

(下转第 49 页)

- [2] 李志月. 半刚性节点连接空间框架结构分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.
- [3] 中国工程建设标准化协会. 端板式半刚性连接钢结构技术规程: CECS260:2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [4] YEE Y, YEE R, Melchens, Moment-rotation curves for bolted connection, *Journal of Structural Engineering* [J]. ASCE, 1993, 112(3): 615 – 635.
- [5] JONES S, KIRBY P, NETHERCOT D. Columns with semi-rigid joints, *Journal of structural Division* [J]. ASCE, 1982, 108(2): 361 – 372.
- [6] COLSON A, IOUVEAU J. Connections Incidence on the Inelastic Behavior of Steel Structures [C]. *Euromech Colloquium* 174, 1983.
- [7] KISHIN, CHEN W. Moment-rotation relations of semirigid connections with angles. *Journal of Structural Engineering* [J]. School of Civil Engineering, ASCE, 1990, 116(7): 1813 – 1834.
- [8] 李国强, 石文龙, 王静峰. 半刚性连接框架结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [9] 刘伟. 半刚性连接钢框架设计理论与方法[D]. 南京: 东南大学, 2016.

(上接第 19 页)

- [5] ALIREZA R, PARTHA P. Tornado-induced wind loads on a low-rise building: Influence of swirl ratio, translation speed and building parameters [J]. *Engineering Structures*, 2018, 167: 1 – 12.
- [6] 陈旭, 黄珑霆, 丁福祥, 等. 超大型冷却塔龙卷风作用塔筒内表面风荷载特性研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(21): 31 – 38.
- [7] 陈艾荣, 刘志文, 周志勇. 大跨径斜拉桥在龙卷风作用下的响应分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(5): 569 – 574.
- [8] LIU Z, ZHANG. Numerical study of the wind loads on a cooling tower by a stationary tornado-like vortex through LES [J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2018, 81: 656 – 672.
- [9] 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): 9.
- [10] LIU Z, ISHIHARA T. A study of tornado induced mean aerodynamic forces on a arch-roofed building by the large eddy simulations [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2015, 146: 39 – 50.
- [11] 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.
- [12] WARD, NEIL B. The Exploration of Certain Features of Tornado Dynamics Using a Laboratory Model [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1972, 29(6): 1194 – 1204.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.