

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202006003

下击暴流下单立柱三面式广告牌风压特性研究*

涂佳黄¹, 吕海宇¹, 唐彪^{1,2}, 熊龙祥¹

(1. 湘潭大学土木工程与力学学院, 湖南湘潭 411105; 2. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北武汉 430040)

摘要: 基于计算流体动力学理论, 采用雷诺平均方法对下击暴流作用下单立柱三面式广告牌结构风压分布进行三维数值计算。首先, 通过模拟下击暴流风场风剖面验证计算模型及参数准确性。然后, 主要分析径向距离和风向角对广告牌风压分布特性的影响。数值结果表明: 径向距离和风向角对广告牌风压分布特性有较强影响, 当结构置于 $R=0D_{jet}$ 时, 广告牌内外表面均承受较大压力; 而 $R=1D_{jet}$ 时, 广告牌各面板所受压力达到最大值, 然后随径向距离逐渐增大其数值不断减小。随风向角不断增大, 广告牌各面板前后叠加风压系数逐渐增大, 广告牌迎风面风压系数分布由不对称逐渐转变为对称分布, 受高压区域面积也随之逐渐增大。

关键词: 下击暴流; 广告牌; 径向距离; 风向角; 风压系数

中图分类号: TU352.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0320-10

Study on Wind Pressure Characteristics of Billboard under the Thunderstorm Downburst

TU Jiahuang¹, LYU Haiyu¹, TANG Biao^{1,2}, XIONG Longxiang¹

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. China Construction Third Bureau First Construction Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: Based on the computational fluid dynamic theory, the wind pressure characteristics of the billboards were investigated numerically under thunderstorm downburst by using Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) model. The accuracy of the calculation model and parameters were verified firstly by simulating the wind profile of the downburst wind field. After that the effects of radial position and wind direction on the wind pressure coefficients of the billboards were analyzed emphatically. Results indicate that the radial position and wind direction have great influences on the wind pressure distribution of the billboard. All surfaces of the model are subjected to greater positive pressure at $R=0D_{jet}$ and reach the peak pressure value at $R=1D_{jet}$, then gradually decrease with the radial distance increasing. The superimposed wind pressure coefficient of the front and rear surfaces rises as the wind direction increases. Meanwhile, the wind pressure coefficient distribution on the windward surface changes from asymmetrical to symmetrical, and the area under high pressure gradually increases.

Keywords: thunderstorm downburst; billboard; radial position; wind direction; pressure coefficients

* 收稿日期: 2020-06-03; 修回日期: 2020-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(11602214)、湖南省自然科学基金项目(2020JJ4568, 2021JJ50027)、湖南省教育厅科学研究项目(21A0103)资助

作者简介: 涂佳黄(1982—), 男, 副教授, 博士。主要从事结构风工程与流固耦合方面的研究。

E-mail: tujiahuang1982@163.com

引言

随着全球气候变化,以下击暴流为代表的强对流天气灾害在强度、频率和复杂性方面逐渐增加。其独特风场结构对户外广告牌建筑、吊车、塔架等风灾易损结构物造成严重破坏,因此国内外学者通过各种研究手段对下击暴流展开研究^[1-12]。1978年 T. T. Fujita^[1]首次提出下击暴流的概念,即雷暴天气中高空冷暖气流交锋,产生高速俯冲气流冲击地面,随后受地表阻碍作用朝四周急速扩散,这种俯冲气流现象即为下击暴流,其破坏范围约为几十米至几百千米^[2]。王佳宁^[3]与赵倩等^[4]通过多普勒雷达分别对齐齐哈尔市和合肥市下击暴流天气进行分析,数据显示下击暴流的强弱与不稳定能量下沉原始高度和速度密切相关。汤卓等^[5]采用大涡模拟方法对方形高层建筑进行下击暴流风场数值模拟,获得高层建筑在雷暴冲击风作用下的风荷载参数,并与大气边界层风荷载进行对比。吉柏锋等^[6]和席保峰^[7]分析了下击暴流作用下高层建筑表面风压分布特性,研究高宽比对建筑表面风压分布特性的影响。强风天气下,独立柱广告牌倒塌可能会造成交通堵塞,严重时亦会对行人安全构成极大危险^[8]。另一方面,宋芳芳^[9]采用时程分析方法,对台风作用下广告牌面板、整体结构失效模式进行研究。汪大海等^[10]通过整体结构气弹性模型响应测力试验,研究三面柔性广告牌基底风振响应随风向角变化规律和特征。D. H. Wang等^[11]通过测压试验研究强风作用下双面及三面式广告牌面板净风压力及其极值分布规律。风灾破坏的发生毫无预兆,开展风灾易损结构物抗风设计研究有着重要意义。

目前关于下击暴流研究主要集中在常规高层建筑、大跨结构以及输电线塔,缺少对风灾害中受损比例较大的广告牌风压特性研究。本文对下击暴流作用下三面单立柱广告牌风压分布问题进行三维数值研究,主要分析径向距离和风向角对广告牌风压分布的影响,针对广告牌建筑模型周围流场分布以及整体风压系数分布和面板局部最不利风压系数展开研究。

1 数值方法

1.1 控制方程与模型

基于雷诺平均理论,不可压缩流体控制方程形

式如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度; u 为流速; μ 为动力粘性系数; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力。1986年,T. H. Shih等^[12]提出 Realizable $k-\epsilon$ 模型,该模型对流动分离以及时均应变、压力梯度变化较大等实际情况具有较强适应性。湍动能和湍流耗散率表达式如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ \rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{2\epsilon} G_b \end{aligned} \quad (4)$$

$$C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right) \quad (5)$$

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon} \quad (6)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

式中, k 为湍动能; μ_t 为湍动黏度; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能产生; G_b 由浮力影响引起的湍动能产生; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响; $\sigma_\epsilon=1.3$; C_1 、 C_2 、 $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 C_u 为经验常数; σ_k 、 σ_ϵ 分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数,取值为 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\epsilon=1.3$ 。

1.2 算例验证

图1给出了CFD模拟结果与实测数据、数值模拟以及风洞试验得出的下击暴流风剖面对比。为更好地进行比较,首先对径向风速进行无量纲处理,横坐标采用 V_r/V_{jet} ,纵坐标采用 Z/D_{jet} ,其中 V_r 为径向风速, Z 为距地高度, Z_m 为速度达到最大值对应高度, V_m 为径向最大风速。将本文数值模拟得到

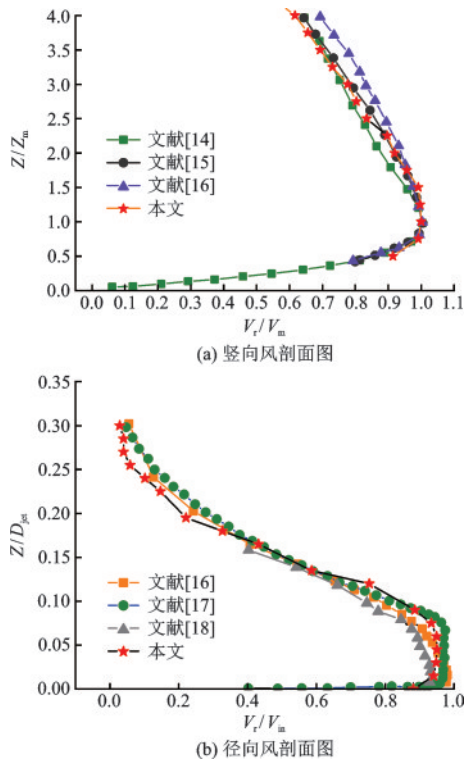


图1 本文数值模拟结果与现有文献对比

Fig.1 Comparison of the wind profile with published references

风速剖面数据与现有文献[14-18]中数据进行对比,可见数值模拟的结果与文献结果吻合较好,因此本文采用的方法具有较好的可靠性与适用性。本文均以无量纲平均风压系数 C_p 反映建筑表面的风压分布, C_p 以速度入口位置作为风压力参考点,其定义为 $C_p = (P - P_{jet}) / 0.5\rho V_{jet}^2$, P 为目标平均压力, P_{jet} 为下击暴流速度入口位置中心处静压, ρ 为空气密度值, V_{jet} 为下击暴流入口位置处初始风速。

2 问题描述

本文采用 1:1 000 缩尺模型进行研究,几何模型和边界条件如图 2 所示。计算域为 $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 1.8\text{ m}$,初始出流直径 $D_{jet} = 0.6\text{ m}$,初始出流高度 $H_{jet} = 1.2\text{ m}$,刚性广告牌建筑模型的尺寸为 $0.012\text{ m} \times 0.006\text{ m} \times 0.018\text{ m}$ 。边界条件设置如下:下击暴流最适宜的模拟初始条件入口速度为 $V_{jet} = 29\text{ m/s}$,本文采用 M. S. Mason^[13] 推荐的速度缩尺初始出流速度 $V_{jet} = 10\text{ m/s}$,湍流强度为 1%,侧面和顶面均为压力出口,入口侧面选取滑移壁面边界条件,地面和建筑表面采用无滑移壁面,壁面采用增强壁面处理模型,模型的动量、湍动能、湍流耗散

率采用 QUICK 进行离散。计算时间步长为 0.01 s。本文所研究的广告牌模型尺寸、风向角及测点布置情况如图 3 所示。

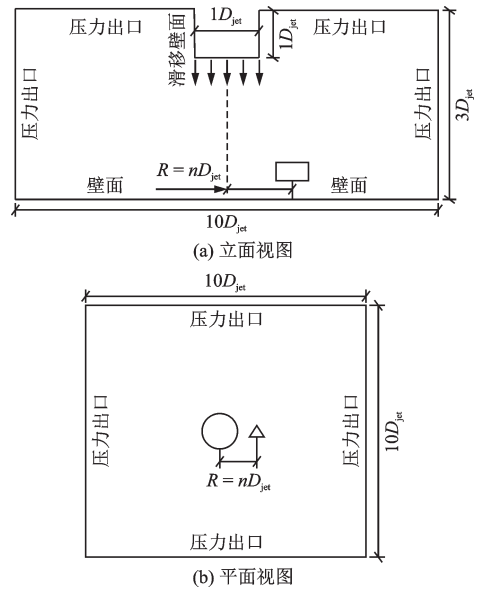


图2 计算域和边界条件示意

Fig.2 Schematic diagram of computational domain and boundary conditions

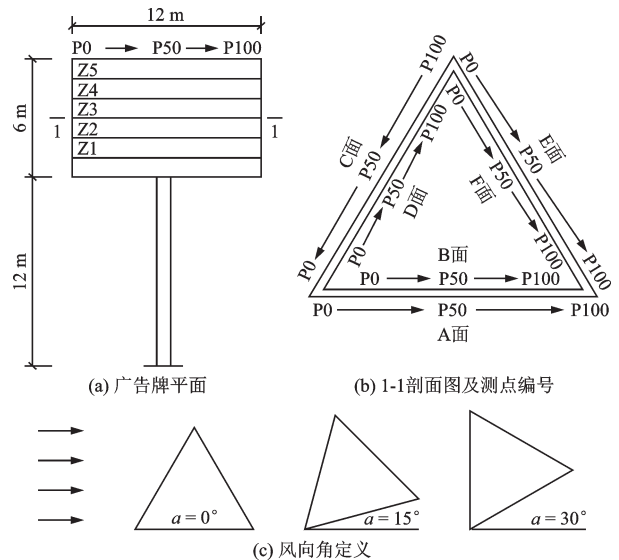


图3 广告牌模型尺寸及测点布置

Fig.3 Model configurations and locations of pressure taps

为确保能更好捕捉流体流动,以流场入口为中心进行十字加密并对广告牌周边区域进行局部加密,如图 4(a)、(b)所示。同时为满足处理壁面时壁面函数对网格的要求,近壁面首层网格至壁面距离满足无量纲距离 $y^+ \leq 1$,模型第一层距壁面网格距离为 $2 \times 10^{-5}\text{ m}$,网格尺寸为 0.1 m。为进行网格无

关性验证,将三种不同网格数量进行对比验算,并选取径向位置 $1D_{jet}$ 处广告牌模型迎风面Z3高度处风压系数分布情况,如图4(c)所示。计算结果显示三种不同网格数量广告牌Z3高度风压系数基本吻合,网格数量选取750万左右可以有效提高计算效率,本文网格总数为750万。

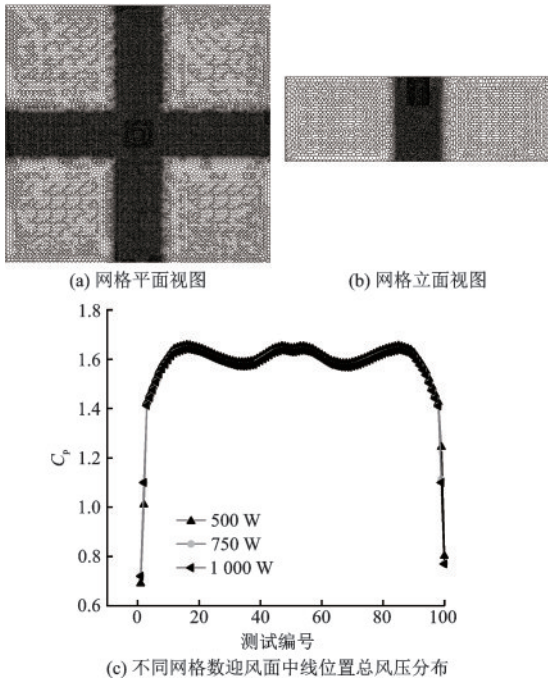


图4 广告牌模型网格划分及网格独立性验证

Fig.4 Schematic diagram of the meshes of billboard and grid independence verification

3 计算结果与分析

3.1 流场分析

下沉气流接触地面后作用于广告牌内外表面,由于广告牌外形棱角突出,气流在广告牌棱角处会发生分离,并会在多处形成旋涡。广告牌内部和周围流场充满着撞击、分离、再附和涡旋等复杂流动现象。当 $\alpha=0^\circ$ 时,下沉气流垂直撞击广告牌面板C靠近风场一端,大部分来流顺着倾斜角度流向面板C远离风场一侧,面板C两侧来流速度逐渐增大,面板AC与面板CE交界处均发生分离现象。广告牌中空部分区域空间较大,受上下两侧高速来流阻力作用,广告牌内部形成旋涡,内面均受到吸力作用。面板E流出气流受到上方高速气流阻力作用形成旋涡,如图5(a)所示。

当 $\alpha=15^\circ$ 时,下沉气流以较大倾斜角度加速绕面板A,在交界处发生分离现象,面板A前端受到吸力作用产生明显负压。部分气流顺着面板D向下顺时针流动,另一部分气流受到来流阻力作用向上逆时针流动,随流速逐渐减小,面板D中心部分流动发生再附,随后向两侧散开。来流与面板C侧边流出气流汇合后加速流过面板E,交界处气流速度逐渐增大,流动在面板CE交界处发生分离,随后在面板E远离风场一端发生再附。

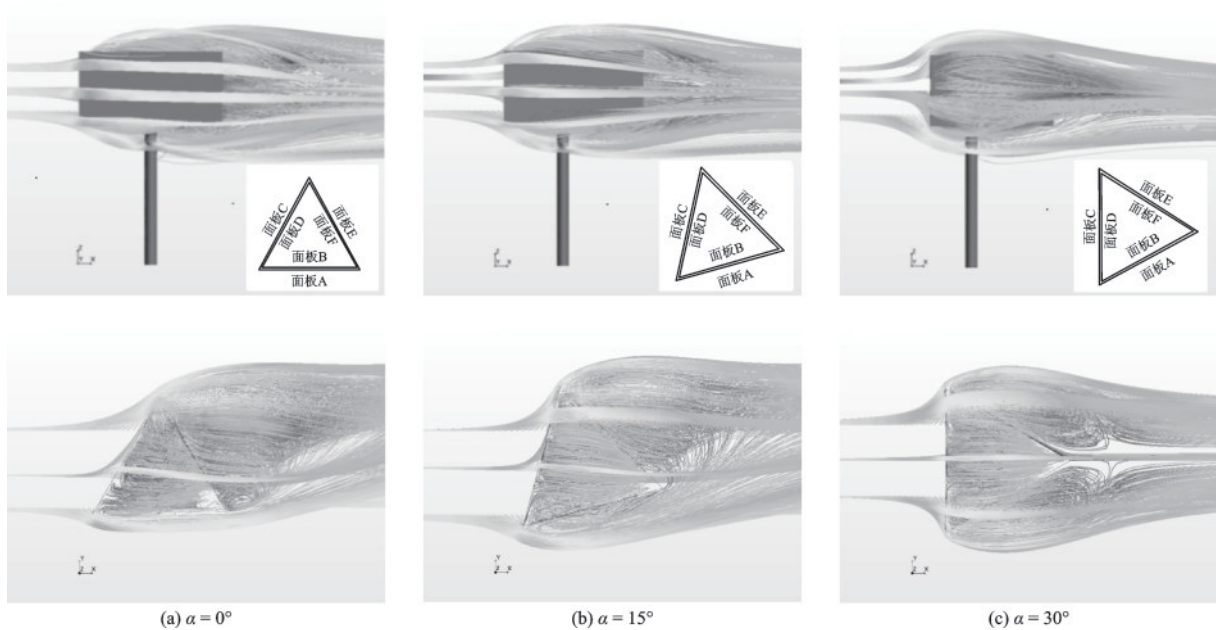


图5 不同风向角下下击暴流风场中单立柱三面式广告牌结构周围流场分布

Fig.5 Distribution of the flow around billboard under different wind directions

当 $\alpha=30^\circ$ 时,下沉气流垂直作用于广告牌面板C,面板C中心存在气流停滞点,气流接触面板C区域速度逐渐减小,随后向停滞点四周散开。一部分气流受到上部来流阻力作用沿面板D向下流动,另一部分气流沿面板D往上流动,在广告牌内部形成上下两个运动方向相反的旋涡。面板C与面板A交界处流出气流受到来流阻力作用沿面板A尾部流动,靠近风场侧形成一个逆时针运动的旋涡。面板C与面板E交界处流出气流沿面板E尾部流动,形成一个顺时针运动的旋涡,如图5(c)所示。

3.2 风压分布特性随风向角变化规律

图6~11分别给出了 $R=1D_{jet}$ 径向位置处、不同风向角作用下,广告牌面板风压分布规律以及不同高度处总风压系数变化情况。当 $\alpha=0^\circ$ 时,来流在AC面板交界处速度增大使得流动完全分离,面板A前端位置(P0-P10)受到较大吸力作用风压系数达到-1.0,尾端稳定在-0.2附近。面板B压力系数在靠近风场侧分布均匀,负压绝对值达到0.4。远离风场侧气流速度减小,各高度处总风压系数大部分区域(P10-P90)呈现正值。各高度处总风压系数

分布在P0-P50区域一致,在P5附近达到负压峰值,Z1、Z2、Z3峰值大小维持在-0.65附近,Z4、Z5高度达到-0.8。远离风场一侧(P50-P100)Z5高度处总风压系数变化幅度大,在P70附近达到峰值0.4,随后在P100附近迅速减小至-0.4,其他各高度数值均维持在-0.2附近,如图7(a)所示。

面板C超过60%区域风压系数达到0.8,在靠近风场一端(P0-P20)达到峰值1.0,后沿远离风场一侧逐渐减小至0.2,面板C风压系数关于Z3对称分布。面板D上下端交界处小部分区域数值达到-0.6,面板D压力系数分布呈中间小、上下两端大。面板D远离风场一侧压力系数绝对值相对较小,数值为-0.4,靠近风场一侧压力系数达到-0.46。广告牌面板CD各高度处总风压系数均小于其他风向角工况,仅有20%左右区域达到1.4。各高度总风压系数均在P5附近达到峰值,随着风速减小数值逐渐减小至0.4。面板CD近风场侧总风压系数分布比较紊乱,Z1高度处峰值较大,数值达到1.58,其余各高度处总风压系数峰值基本维持在1.52附近。广告牌四周受来流分离影响,风压逐渐减小,中间高度处(Z2、Z3、Z4)受到显著冲击作用整体总风压系数偏大,如图7(b)所示。

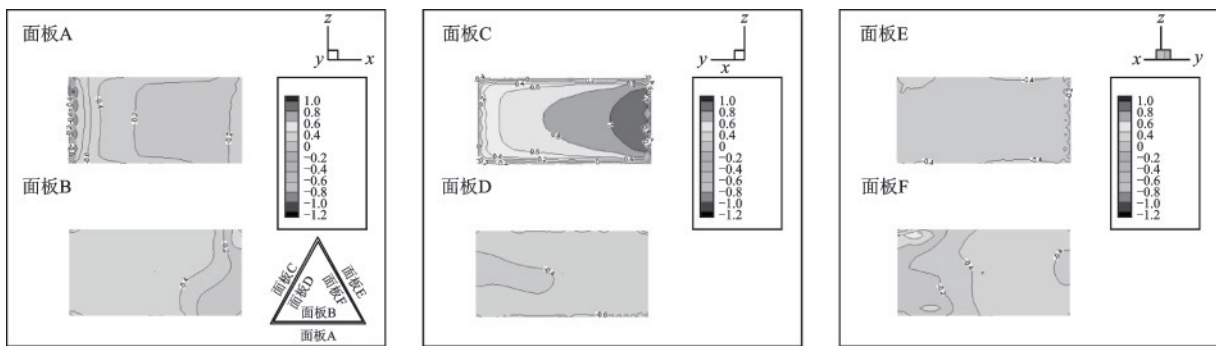


图6 $\alpha=0^\circ$ 风向角下下击暴流风场中广告牌风压系数分布

Fig.6 Distribution of wind pressure coefficients on the surface of billboards at $\alpha=0^\circ$

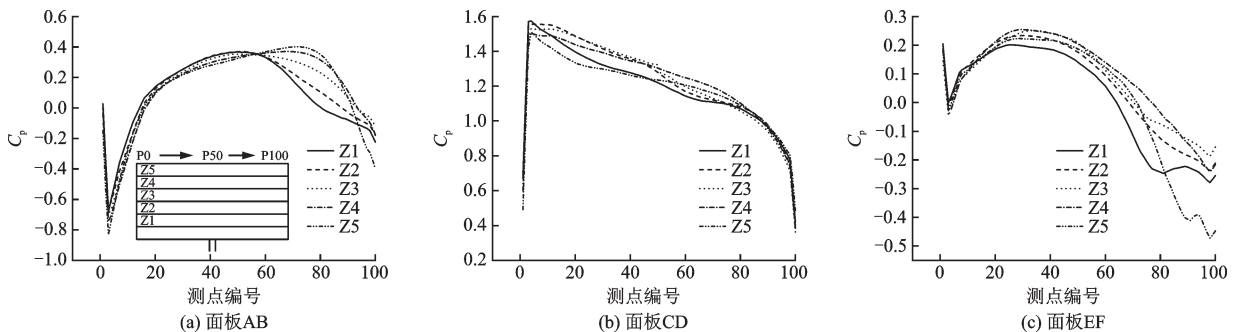


图7 $\alpha=0^\circ$ 风向角下下击暴流风场中广告牌不同高度处总风压系数

Fig.7 Distribution of total wind pressure coefficient at different heights of the billboards at $\alpha=0^\circ$

面板E风压系数整体分布均匀,与面板A、C交界处发生分离受到较大吸力,分别达到 -0.35 和 -0.4 ,上下两端压力系数较大,中间部分数值较小。面板F靠近风场一侧受到强吸力作用,压力系数为 -0.5 。面板EF各高度处总风压系数分布在P0-P50区域基本一致,各高度处靠近风场侧受压显著,后变为负值。在面板EC交界处达到峰值 0.2 ,在P5测点附近迅速减小为 -0.05 ,P35测点附近又增至 0.2 ,随尾端流速减小,远离风场侧各高度总风压系数又变为负值,达到负压峰值。Z1和Z5高度处总风压系数分别由 0.22 、 0.18 减小至 -0.5 、 -0.3 ,中间三个高度处总风压系数变化趋势接近一致,如图7(c)所示。

当 $\alpha=15^\circ$ 时,面板A前端受到较大吸力,部分区域风压系数达到 -1.2 左右。尾端远离风场流速降低,利于流动再吸附,风压系数绝对值较小。面板B压力系数绝对值在广告牌中间部分达到最大值 0.65 ,随后沿两侧不断减小。各高度总风压系数分布规律与 $\alpha=0^\circ$ 工况类似,负压峰值出现的位置相近。高度处(Z2、Z3、Z4)总风压系数在P0-P10区域基本一致,Z5高度处风压系数峰值略小于 $\alpha=0^\circ$ 工况,总风压系数为0出现的位置逐渐往面板A右端移动。各高度总风压系数在P20-P70区域始终小于 $\alpha=0^\circ$ 工况,在面板A的P60测点附近达到最大值,后沿远离风场一侧减小至0附近,如图9(a)所示。

面板C90%以上的区域风压系数达到 0.8 ,且60%区域风压系数达到 1.0 。面板D中间部位风压系数分布均匀,数值维持在 -0.5 附近,来流沿面板D上下两端流出发生分离现象,上下两端受到较大吸力作用,压力系数达到 -0.6 。面板CD整体受到的压力逐渐增大,面板CD超过80%左右区域(P10-P90)总风压系数均达到 1.4 。各高度处总风压系数峰值为 1.65 ,且逐渐移动到P10附近,随后在P90测点附近减小至 1.4 ,尾端边缘处数值仅为 0.8 。广告牌中间区域(P30-P70)各高度总风压系数变化波动较大,Z4高度处总风压系数始终大于其他高度,如图9(b)所示。

面板E靠近风场侧受到旋涡吸力作用,远离风场侧风速较低使得流动发生再附现象,总压力系数减小。面板E靠近风场一侧上下两端压力系数达到 -0.5 ,中间部分压力系数稳定在 -0.32 。面板F风压系数在靠近面板D附近达到负压绝对值峰值

0.65 ,随后沿远离风场侧逐渐减小,面板BF交界处压力系数维持在 -0.2 左右。各高度总风压系数正值峰值出现的位置逐渐由P35移动到P50附近。随着风向角增大,面板F受到的吸力强度逐渐增大,P0-P80区域总风压系数始终为正压,在BF交界处附近逐渐转变为负值,远离风场侧内外面受到的吸力较小,各高度处负压峰值维持在 -0.05 左右。Z3和Z4高度总风压系数一致,数值由 0.35 减小至0附近,Z1高度处总风压由 0.25 减小至 -0.1 ,如图9(c)所示。

当 $\alpha=30^\circ$ 时,面板A前端受到吸力作用,部分区域风压系数达到 -0.6 ,随后负压在靠近风场一侧快速减小到 -0.4 。远离风场一侧气流速度减小发生再附,风压系数维持在 -0.1 左右。面板B靠近风场一侧风压系数达到 -0.65 ,后沿远离风场侧风压系数不断减小。面板AB总风压系数超过90%区域受正压。AC面板交界处各高度负压峰值仅为 -0.2 左右,随后在P10测点附近变为0,远离风场一侧各高度总风压系数波动较小。Z1和Z2两个高度均在P40附近达到正值最大值,随后在P100处减小至 0.05 ,Z3、Z4、Z5三个高度极值出现的位置逐渐右移,在P60附近均达到峰值 0.32 ,随后沿远离风场一侧逐渐减小至 0.15 ,如图11(a)所示。

面板C正面均受正压,中心处压力系数达到 1.1 ,随后沿面板C左右两侧压力系数逐渐减小至 0.87 ,整个面压力系数分布均匀且关于广告牌中心线对称。面板D中心部位压力系数绝对值达到 0.54 ,立柱左右两侧出现两个对称的极小值区域。各个高度处总风压分布规律基本一致,近似关于广告牌中心线左右对称,随风向角增大,风压系数峰值逐渐右移。面板CD边缘处总风压系数相对较小,中间区域(P10-P90)变化较为平缓,稳定在 1.6 附近,各高度超过90%区域总风压系数达到 1.5 。Z5高度处波动较小,数值始终维持在 1.6 左右,Z2和Z3高度处两侧峰值达到 1.7 ,在中间位置附近减小至 1.6 ,Z4高度总风压系数较大,而Z1高度处较小,中间区域数值为 1.55 ,两侧总风压峰值达到 1.6 ,如图11(b)所示。

由于靠近风场一侧受流动分离和旋涡吸力作用,各高度总风压系数均在面板EF前端P5测点附近负压达到峰值 -0.25 ,随后逐渐转变为正值,面板90%以上区域(P10-P100)为正压。各高度总风压系数分布在面板EF前端(P0-P30)基本一致,尾端

部位分布紊乱,Z1和Z2两个高度均在P30附近达到最大值,在P100减小至0.05。然而Z3、Z4、Z5三个

高度处总风压最大值出现位置向右侧移,在P60附近都达到峰值0.32,如图11(c)所示。

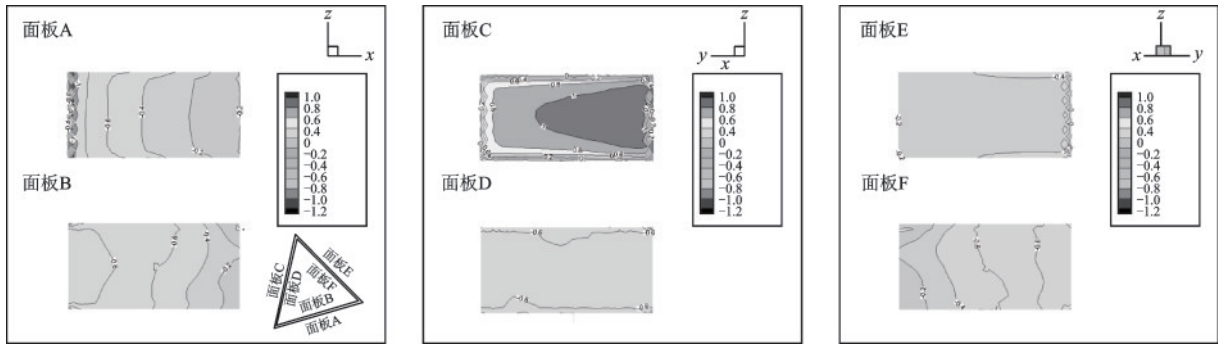


图8 $\alpha=15^\circ$ 风向角下下击暴流风场中广告牌风压系数分布

Fig.8 Distribution of wind pressure coefficients on the surface of billboards at $\alpha=15^\circ$

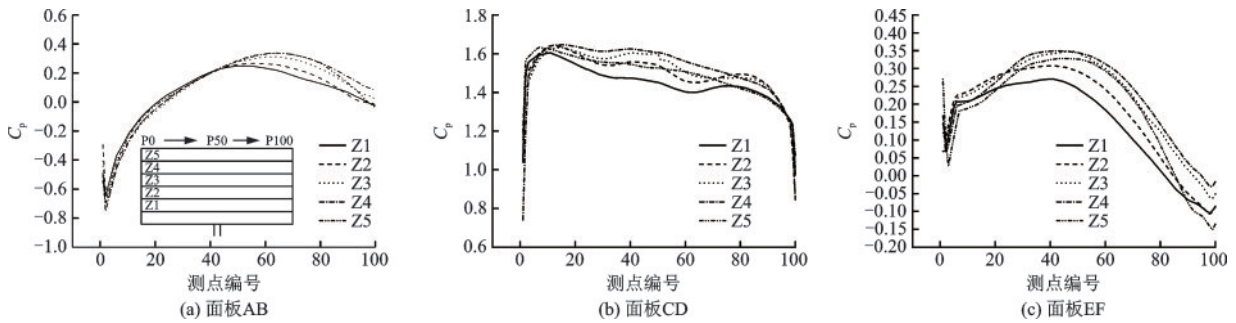


图9 $\alpha=15^\circ$ 风向角下下击暴流风场中广告牌不同高度处总风压系数

Fig.9 Distribution of total wind pressure coefficient at different heights of the billboards at $\alpha=15^\circ$

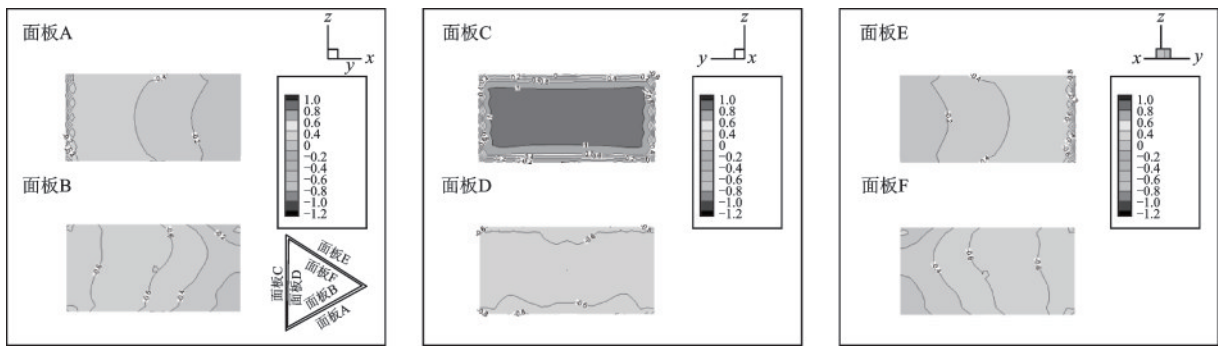


图10 $\alpha=30^\circ$ 风向角下下击暴流风场中广告牌风压系数分布

Fig.10 Distribution of wind pressure coefficients on the surface of billboards at $\alpha=30^\circ$

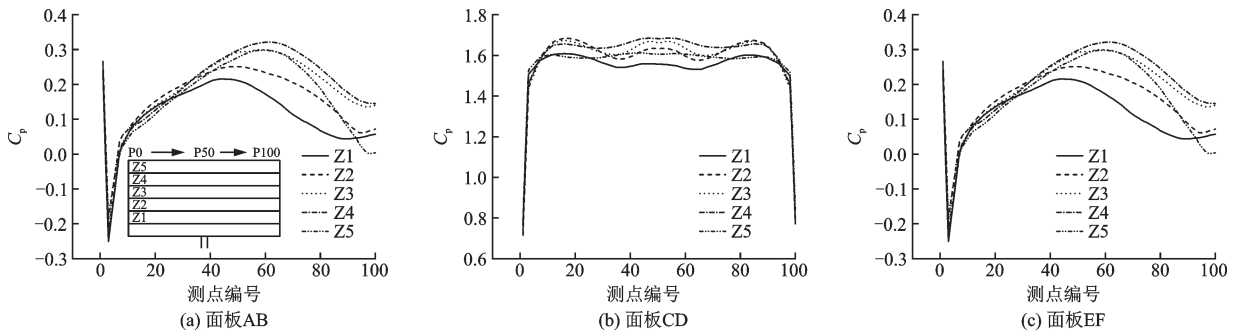


图11 $\alpha=30^\circ$ 风向角下下击暴流风场中广告牌不同高度处总风压系数

Fig.11 Distribution of total wind pressure coefficient at different heights of the billboards at $\alpha=30^\circ$

3.3 风压分布特性随径向距离变化规律

图 12、13 分别给出了 $\alpha=30^\circ$ 广告牌面板 CD 在不同径向位置处面板风压系数分布云图以及面板 CD 不同高度区域总风压系数分布。当广告牌置于风口正下方时,下沉气流直接撞击广告牌顶部,随后迅速穿过广告牌向四周扩散。广告牌面板 AB 和面板 CD 顶端压力系数均达到 1,又沿下端缓慢减小,如图 12(a)所示。径向距离增大至 $R=1D_{jet}$,面板 C 受到较大的冲击力,中心区域压力系数达到峰值 1.13,随后沿面板 C 左右两侧压力系数逐渐减小至 0.87,上下两端压力系数在 0.7 左右。面板 D 中心部位压力系数绝对值达到 0.54,立柱左右两侧出

现两个对称极小值区域,数值为 -0.48 ,如图 12(b)所示。各高度总风压系数分布波动较大,最小值均出现在面板 CD 两侧(P0 和 P100 位置)。Z5 高度在 P10-P90 区域数值始终维持在 1.60 左右;Z1 高度在两侧(P10、P90)达到峰值 1.61,随后沿面板 CD 中心减小至 1.54;Z2 和 Z3 高度变化趋势大体一致,均在两侧(P20 和 P85)附近达到峰值,数值分别为 1.67 和 1.68;Z4 从两侧沿面板 CD 中心总风压系数不断增大到峰值 1.68,如图 13(a)所示。

当径向距离增大,风剖面径向风速在不断减小,故面板 C 风压系数最大值也有减小趋势,风压系数最大值为 0.52($R=3D_{jet}$),面板 C 边缘处压力系数随径向距离的增大,数值由 0.8 逐渐减小至 0 附近。

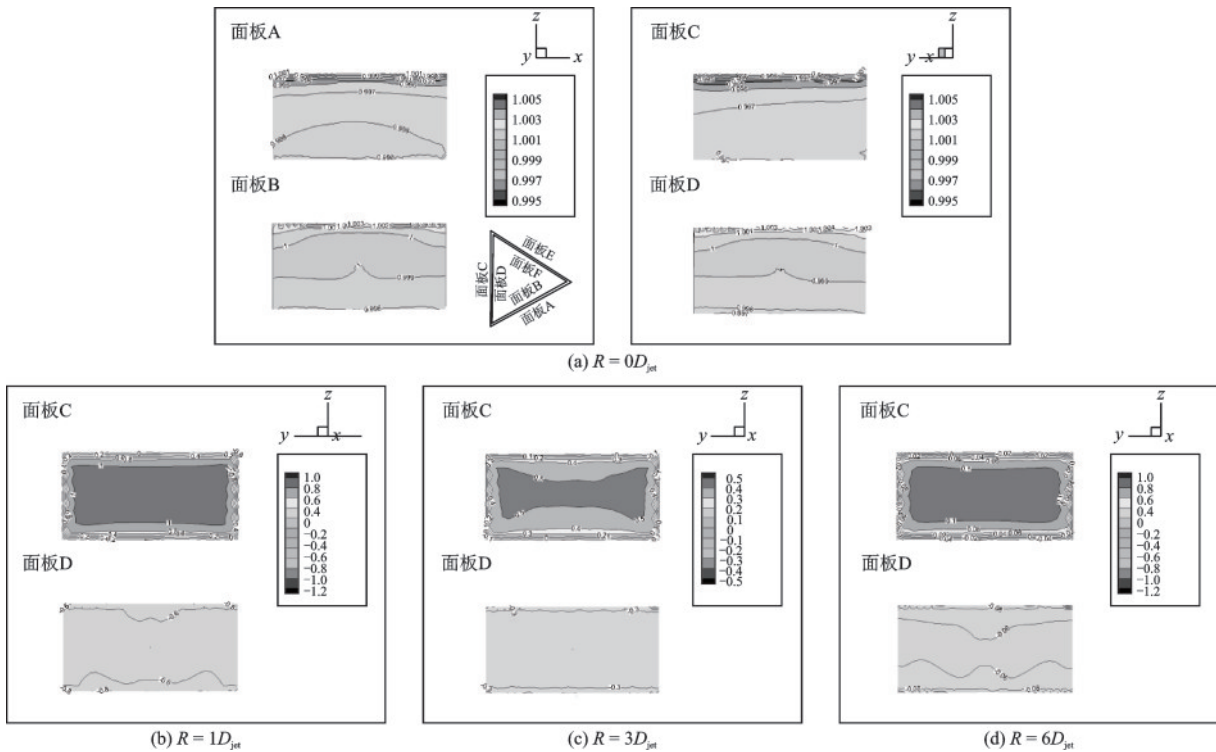


图 12 不同径向位置处下击暴雨风场中广告牌面板 CD 风压系数分布

Fig.12 Distribution of wind pressure coefficients on the CD surface of billboards at different radial positions

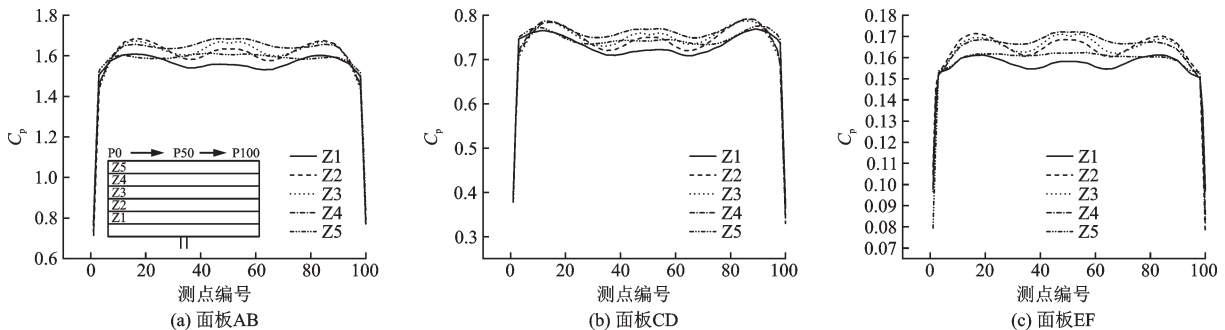


图 13 不同径向位置处下击暴雨风场中广告牌面板 CD 不同高度处总风压系数

Fig.13 Distribution of total wind pressure coefficients on different heights of CD surface at different radial positions

面板D压力系数分布相对均匀,数值维持在-0.25左右,如图12(c)所示。不同径向位置处各个高度总风压系数分布规律基本一致,近似关于广告牌中心线左右对称,两侧风压系数相对较小,中间区域(P10-P90)风压系数变化相对平缓,总风压系数峰值为0.8($R=3D_{jet}$)。随径向距离进一步增大,面板C压力系数数值波动变化较小,中心区域最大风压系数为0.11($R=6D_{jet}$)。面板D压力系数在 $R=6D_{jet}$ 时压力系数很小,仅为-0.05,如图13(c)所示。

图14、15分别给出了 $\alpha=30^\circ$ 广告牌面板AB在不同径向位置处风压系数分布云图以及面板AB不同高度区域总风压系数分布。当 $\alpha=30^\circ$ 时,面板AB与面板EF关于来流对称,故本节只分析面板AB风压系数分布随径向距离变化规律。 $R=1D_{jet}$ 时,面板A板C交界处受到较大吸力作用,风压系数达到-0.65。远离风场侧负压逐渐减小至-0.1,面板A风压系数分布呈左端大右端小,风压系数在靠近风场一侧吸力较大达到峰值,随后沿远离风场一侧数值不断减小。面板B靠近风场一侧空间狭小受到的吸力相对较大,部分区域压力系数达到-0.65,随后沿远离风场一侧风压系数绝对值不断减小,如图14(a)所示。各高度处总风压系数均在

P3附近达到负压峰值-0.25,后在P10测点附近逐渐转变为正值,并在远离风场一侧达到峰值。Z4高度压力系数在测点P60附近达到峰值0.32,随后在尾端逐渐减小至0.15。Z2和Z3高度处压力系数略大于Z1高度,Z5高度压力系数下降梯度较大,如图15(a)所示。

径向距离增大至 $R=3D_{jet}$,面板A受到的吸力强度逐渐减弱,压力系数维持在-0.35。由于来流在面板A上下两侧发生分离,面板A压力系数分布呈上下两端大中间小的形态。增大距离后面板AB各个高度总风压系数变化趋势同 $R=1D_{jet}$ 一致,均在靠近风场一侧达到负压峰值,随后沿远离风场侧转变为正值。Z1和Z2高度处总风压系数相对较小,P45附近峰值仅为0.10以及0.08。Z3、Z4、Z5三个高度在不同径向位置处总风压系数变化趋势一致,峰值大小接近,随高度增大,总风压系数出现正值峰值的位置向右侧移动。当径向距离进一步增大到 $R=6D_{jet}$ 时,面板A压力系数分布均匀,数值变化较小,负压峰值维持在-0.085附近,远离风场侧高度最大总风压系数仅为0.025。Z1、Z2高度处的总风压系数始终小于Z3、Z4、Z5处,如图15(c)所示。

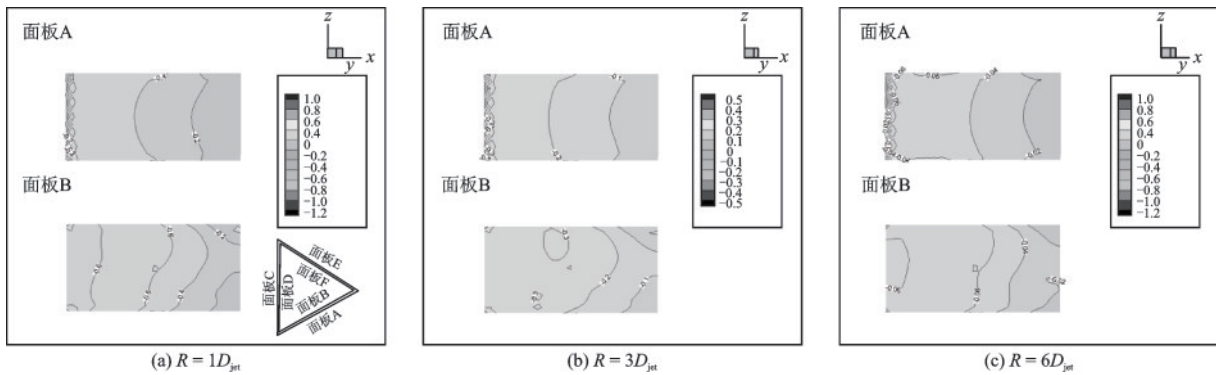


图14 不同径向位置处下击暴流风场中广告牌AB面风压系数分布

Fig.14 Distribution of wind pressure coefficients on the AB surface of billboards at different radial positions

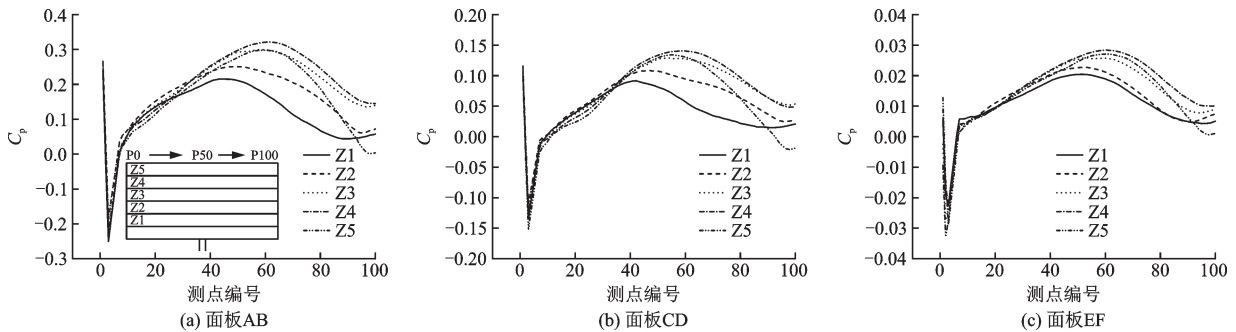


图15 不同径向位置处下击暴流风场中广告牌面板AB不同高度处总风压系数

Fig.15 Distribution of total wind pressure coefficients on different heights of AB surface at different radial positions

4 结 论

对不同径向位置 and 不同风向角下, 广告牌建筑风压系数云图以及面板不同高度处总风压系数分布特性进行了研究, 揭示径向位置和风向角对广告牌建筑风压分布影响规律。主要结论如下:

(1) 不同径向位置处广告牌各表面风压系数分布规律类似, 模型置于风口正下方时, 广告牌内外表面承受较大压力, 随径向距离增大, 压力系数逐渐减小。在 $\alpha=30^\circ$ 、 $R=1D_{\text{net}}$ 时, 面板 CD 的 Z2、Z4 高度总风压系数出现所有工况最大值, 数值为 1.7。

(2) 广告牌与下沉气流垂直接触的边角交界处均发生分离现象, 受上下两侧高速来流阻力作用, 广告牌中空区域形成旋涡, 广告牌内面均受到吸力作用, 各面板在吸力和冲击力叠加作用下破坏几率增大。

(3) 当风向角改变, 广告牌表面风压系数分布有显著变化。当风向角增大, 面板各高度处前后总风压系数也增大, 广告牌迎风面风压分布由不对称逐渐转为对称分布, 面板受高压区域面积增大。广告牌上下边风压系数峰值较其余区域小, 风压系数近似呈关于 Z3 对称分布。

参考文献:

[1] Fujita T T. Manual of downburst identification for project NIMROD[R]. Chicago: University of Chicago, 1978.

[2] 李梦婕, 申双和, 李雨鸿, 等. 北京一次下击暴流的三维数值模拟分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(6): 22-29. Li M J, Shen S H, Li Y H, et al. Three-dimensional numerical simulation analysis of a downburst in Beijing [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2013, 13, 7(6): 22-29. (in Chinese)

[3] 王佳宁, 周显伟. 2017年6月齐齐哈尔市一次下击暴流天气分析[J]. 黑龙江气象, 2019, 36(4): 1-5, 21. Wang J N, Zhou X W. Analysis of a downburst weather in Qiqihar City in June 2017[J]. Heilongjiang Weather, 2019, 36(4): 1-5, 21. (in Chinese)

[4] 赵倩, 周后福. 合肥一次低空风切变的观测与分析[J]. 气象科学, 2019, 39(5): 704-710. Zhao Q, Zhou H F. The observation and discussion on mechanism about a typical low-level wind shear in Hefei [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, 39(5): 704-710. (in Chinese)

[5] 汤卓, 吕令毅. 雷暴冲击风荷载的大涡模拟[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(1): 47-51. Tang Z, Lyu L Y. Large eddy simulation of downburst wind load [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(1): 47-51. (in Chinese)

[6] 吉柏锋, 瞿伟廉. 下击暴流作用下高层建筑物表面风压分布特性[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),

2012, 40(9): 89-94.

Ji B F, Qu W L. Mean wind pressure distribution characteristics on tall building under downburst[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2012, 40(9): 89-94. (in Chinese)

[7] 席保锋. 基于数值模拟的下击暴流风荷载特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. Xi B F. Numerical simulation of downburst wind load[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)

[8] 宋芳芳, 欧进萍. 台风“黑格比”对城市建筑物破坏调查与成因分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(4): 8-16. Song F F, Ou J P. Investigation and analysis of structures damage caused by typhoon "Hagubit"[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(4): 8-16. (in Chinese)

[9] 宋芳芳. 几类风灾易损建筑台风损伤估计与预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. Song F F. Typhoon damage estimation and prediction of wind vulnerable structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)

[10] 汪大海, 李志豪. 大型户外单立柱三面广告牌风荷载的试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(8): 11-20. Wang D H, Li Z H. Experimental study of wind load effects on large outdoor single-column-supported three-plate billboard [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(8): 11-20. (in Chinese)

[11] Wang D H, Chen X Z. Wind load characteristics of large billboard structures with two-plate and three-plate configurations[J]. Wind and Structures, 2016, 22(6): 703-721.

[12] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows model development and validation[J]. Computers and Fluids, 1995, 24(3): 227-238.

[13] Mason M S, Wood G S, Fletcher D F. Numerical simulation of downburst winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(11): 523-539.

[14] Vicroy D D. Assessment of microburst models for downdraft estimation[J]. Journal of Aircraft, 1992, 29(6): 1043-1048.

[15] Fujita T T. The Downburst: Microburst and Macroburst[R]. Chicago: University of Chicago, 1985.

[16] Chay M T, Albermani F. Numerical and analytical simulation of downburst wind loads[J]. Engineering Structures, 2006, 28(2): 240-254.

[17] 刘威展. 下击暴流的风场特性以及其作用下高层建筑风荷载研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. Liu W Z. Study on downbursts and its effect on high-rise building[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)

[18] 徐挺. 雷暴冲击风流场试验模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. Xu T. The experimental simulation of thunderstorm downbursts[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)