

高层建筑屋顶广告牌风压分布特性

顾明¹, 陆文强¹, 韩志惠^{1,2}, 周晔毅¹

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海市气象科学研究所, 上海 200030)

摘要: 通过对广告牌沿高层建筑屋顶单边布置、邻边布置、三边布置及四周布置这 4 种方式的刚性模型测压试验, 测量了广告牌面板表面风压, 研究了其分布规律, 讨论了面板表面典型测点脉动风压的频域特性。结果表明: 来流方向与广告牌面板表面斜交时, 不同布置方式的广告牌面板表面平均风压系数及脉动风压系数均比较大, 并且面板边缘附近的数值要比面板内部区域大; 不同布置方式的广告牌面板表面极值风压系数分布不同, 单边布置时出现最大极值风压, 而四周布置时极值风压最小; 对于由多块面板组成的屋顶广告牌, 相邻面板之间出现气动干扰。

关键词: 高层建筑; 屋顶广告牌; 风洞试验; 风压分布; 功率谱

中图分类号: TU312⁺.1

文献标志码: A

Characteristics of Wind Pressure Distribution on Billboards on High-Rise Building Roof

GU Ming¹, LU Wenqiang¹, HAN Zhihui^{1,2}, ZHOU Xuanyi¹

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Meteorological Science, Shanghai 200030, China)

Abstract: The wind pressure on four types of billboards on the high-rise building roof, the arrangements of which were unilateral, adjacent, trilateral and peripheral, was measured with the rigid model pressure tests. The distribution characteristics of mean and fluctuating wind pressure coefficients on different types of billboards and the frequency-domain characteristics of the fluctuating wind pressure of typical pressure taps on the surfaces of the panels were discussed. The results show that the mean wind pressure coefficients and fluctuating wind pressure coefficients on the surfaces of the panels of various arrangements are relatively larger in skew wind case, with the coefficients near the edge larger than those on the inner areas. The distribution of extreme wind pressure coefficients on billboards of various arrangements are also different. The maximum extreme wind pressure appears on the unilateral model and the minimum

pressure appears on the peripheral model. Aerodynamic interference is observed on multi-panel billboards.

Key words: high-rise building; billboards on roof; wind tunnel test; wind pressure distribution; power spectra

随着城市建设的迅猛发展, 大风对城市造成的破坏除了房屋建筑外, 还包括一类易于损坏的构筑物, 如户外广告牌。户外广告牌的形式多种多样, 常见的形式可分为独立式和附属式。独立式广告牌是指自身具有独立结构支撑的广告设施, 如设置在公路两侧的高立柱广告牌; 附属式广告牌是指依附于建筑物、构筑物等设置的广告设施, 如建筑物楼顶广告设施等。大型广告牌的风致倒塌事故已经引起了越来越多学者专家的关注, 但是目前对于其风压和风力研究却相对较少。Letchford 等^[1-2]采用模型风洞试验对悬空矩形广告牌上的风荷载进行了研究。Paulotto 等^[3]采用模型风洞试验考察了一种框架式单面板广告牌周围建筑群风环境对于面板表面风荷载的影响。Warnitchai 等^[4]采用高频天平测力试验分别对单面板及双面板两种矩形广告牌进行了研究。在国内, 金新阳等^[5]、秦云等^[6]采用计算流体力学(CFD)方法对典型户外独立柱广告牌的风荷载进行了数值模拟研究; 沈之容等^[7]则从广告牌结构风振计算方面考虑, 研究了楼顶广告牌结构基本自振周期的计算方法。

目前对于广告牌的风荷载研究主要是针对独立式广告牌特别是单面板广告牌, 而对于我国户外较常采用的独立式三面板广告牌、高低房屋屋顶广告牌的风压和风力研究则少有报道, 我国荷载规范^[8]中也没有相关风载体型系数的规定。为此, 本文对广告牌沿高层建筑屋顶单边布置、邻边布置、三边布置及四周布置这 4 种方式下的面板表面风压分布进行细致研究, 可以为相关结构抗风设计提供一定的参

考.有关独立式广告牌风荷载的研究见另文.

1 试验简介

1.1 风洞及风场模拟

本试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室的 TJ-2 大气边界层风洞中进行.该风洞为闭口回流式矩形截面风洞,试验段尺寸为宽 3 m、高 2.5 m、长 15 m.试验风速范围为 $0.5 \sim 68.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.风压测量、记录及数据处理系统由电子式压力扫描阀系统、PC 机以及相应的信号采集及数据处理软件组成.

依照我国规范,选取 C 类地貌作为试验风场^[8].风场模拟采用在试验段上游安置尖劈和粗糙元来实现,试验风速为 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.C 类风场的平均风剖面指数为 0.22,10 m 处的名义湍流强度为 0.23^[8].图 1 给出了 C 类风场的风洞布置情况、平均风速及湍流剖面.图中: U 代表风速, Z 代表高度, U_{top} 代表模型顶部风速, Z_{top} 代表模型顶部高度, I_u 为湍流度.从图中可以看出,模拟值和理论值吻合得较好.

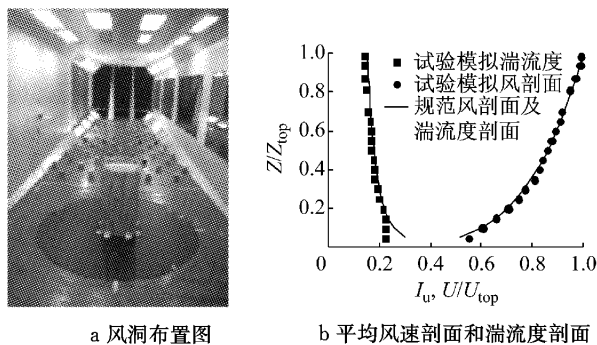


图 1 风洞中模拟的 C 类风场

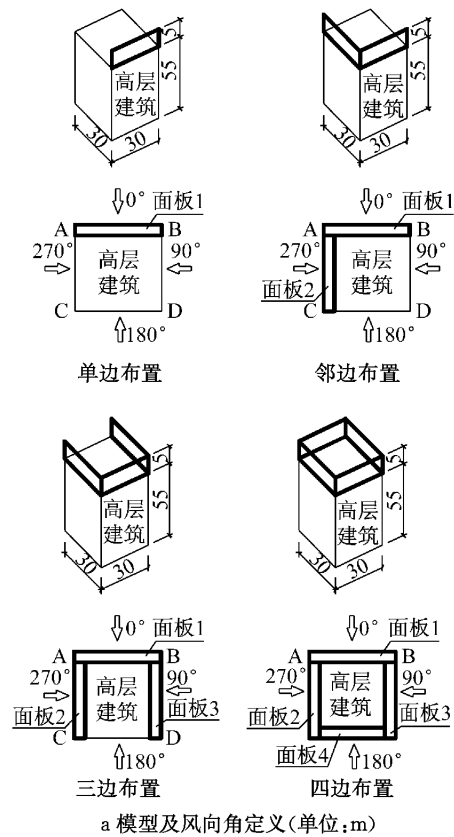
Fig.1 Simulated wind field for terrain category of C

1.2 试验模型

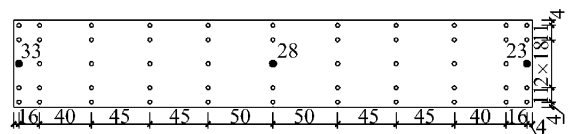
在工程实践中,大型广告牌一般装设在高层建筑楼顶、城市快速道路两侧等人流、车流密集区域,其设置应考虑地方市容管理方面的规定.如上海市规定屋顶设置广告牌的高层建筑高度不得超过 55 m,并且广告牌的高度不得超过 5 m.为了考虑最不利的情况,本次试验研究的高层建筑屋顶广告牌的建筑原型长宽高分别为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 55 \text{ m}$,广告牌原型的面板高 5 m,长度与建筑物长度一致为 30 m.屋顶广告牌在建筑物顶部存在多种布置形式,即矩形建筑物屋顶四边均设置广告牌、三边设置广告牌、两邻边设置广告牌以及单边设置广告牌等.基于此,并考虑典型高层房屋的特点,设计了 4 种结构形式

如图 2a 所示.模型缩尺比为 1:75,缩尺后的广告牌面板尺寸为 $400 \text{ mm} \times 67 \text{ mm}$,广告牌顶部高度为 0.8 m.测点布置采取了边密中疏、满布对称的方式.单个面板表面布置 55 个测点,总测点数为 $55 \times 2 = 110$ 个,测点布置如图 2b 所示.

将垂直吹向面板 1 的风向角定义为 0° 风向角,试验风向角间隔取为 15° ,按顺时针方向增加,每种工况共 24 个风向角,见图 2.



a 模型及风向角定义(单位:m)



b 面板测点布置图(单位:mm)

——代表建筑的外轮廓线 ——代表广告牌的外轮廓线

图 2 模型尺寸及测点布置图

Fig.2 Model configurations and locations of pressure taps

本次试验中,测压信号采样频率为 312.5 Hz,高层建筑屋顶广告牌每个测点采样 16 000 个数据,采样时间为 51.2 s,对应实际采样时长为 20 min.

1.3 试验数据处理方法

面板表面的风压用量纲为一的压力系数表示为

$$C_p(i, \theta, t) = p(i, \theta, t) / 0.5 \rho V_H^2 \quad (1)$$

式中: $C_p(i, \theta, t)$ 和 $p(i, \theta, t)$ 分别为风向角为 θ 时 i 测

点 i 在时刻 t 的风压系数及风压; V_H 是参考动压高度的风速, 这里高度取为面板顶部处高度; ρ 为空气密度. 压力系数为正表示垂直表面的风压为压力, 压力系数为负表示为吸力.

$C_{p_{\text{mean}}}(i, \theta)$ 是测点 i 在风向角 θ 下的平均风压系数, $C_{p_{\text{rms}}}(i, \theta)$ 为测点 i 在风向角 θ 下的脉动风压系数(即为风压系数的均方根值), 从而有

$$C_{p_{\text{max}}}(i, \theta) = C_{p_{\text{mean}}}(i, \theta) + gC_{p_{\text{rms}}}(i, \theta) \quad (2)$$

$$C_{p_{\text{min}}}(i, \theta) = C_{p_{\text{mean}}}(i, \theta) - gC_{p_{\text{rms}}}(i, \theta) \quad (3)$$

式中: $C_{p_{\text{min}}}(i, \theta)$ 为按照统计方法所得的测点 i 在风向角 θ 下的最小风压系数; $C_{p_{\text{max}}}(i, \theta)$ 为最大风压系数; g 为峰值因子, 在这里取 $g = 3.5^{[9]}$.

由于测点 i 在每个风向角下都有一个最小和最大风压系数, 那么在 $0^\circ \sim 345^\circ$ 风向角下总有一个最大值及最小值, 称为测点 i 的最不利正风压系数和最不利负风压系数, 表示为

$$\hat{C}_{p_{\text{max}}}(i) = \max(C_{p_{\text{max}}}(i, \theta)), \theta = 0^\circ \sim 345^\circ \quad (4)$$

$$\hat{C}_{p_{\text{min}}}(i) = \min(C_{p_{\text{min}}}(i, \theta)), \theta = 0^\circ \sim 345^\circ \quad (5)$$

从而可以得到单块面板表面的最大最不利正负风压系数为

$$\hat{C}_{p_{\text{max}}}(i) = \max(\hat{C}_{p_{\text{max}}}(i)), i = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

$$\hat{C}_{p_{\text{min}}}(i) = \min(\hat{C}_{p_{\text{min}}}(i)), i = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

式中, M 为广告牌面板上的测点数.

2 结果及分析

2.1 平均风压系数分布

图3是高层建筑屋顶广告牌沿建筑单边布置(工况1)时, 广告牌面板在 0° , 45° 和 135° 风向角下的平均风压系数分布等值线图. 图中, 广告牌内外表面的定义是以相对于建筑物的位置而定义的, 沿建筑物外墙延伸的面为外表面, 以 0° 风向为例, 迎风面是外表面(见图2); 迎风面的背面为内表面. 从图中可

以看出: ① 0° 风向角下, 面板1外表面的平均风压系数均为正值, 并且左右对称分布, 压力系数值从中部向边缘处逐渐较小; 此时, 面板1内表面均为负压, 其值均为 -0.7 左右. ② 45° 斜风时, 面板1外表面除最边缘少数区域外, 其他区域主要呈现正压, 最大正压值出现在迎风端边缘, 为 0.75 ; 此时, 面板1的内表面负压值均较大, 在靠近面板迎风边缘处出现最大风压, 达到 -1.8 左右. ③ 135° 斜风时, 面板1外表面为背风面, 其值大部分为 $-0.50 \sim -0.55$, 在边缘可达到 -0.65 ; 此时, 面板1内表面前缘为负值, 而在后缘再附, 平均风压为正值.

图4是高层建筑屋顶广告牌沿建筑邻边布置(工况2)、三边布置(工况3)、四边布置(工况4)时, 广告牌面板在 45° 和 135° 风向角下的平均风压系数分布等值线图. 由图可见: ① 45° 斜风时, 面板1外表面的正压区及最大正压值均随着工况号的增加而减小. 面板1内表面均呈现负压, 并且差别不大, 但都显著小于工况1的面板1内表面负压值. ② 135° 斜风时, 4种工况的面板1外表面均主要呈现负压, 而面板1内表面则既有正压区又有负压区, 并且随着工况号的增大, 负压区及最大负压值均逐渐增大, 正压区则正好相反.

2.2 脉动风压系数分布

图5是高层建筑屋顶广告牌沿建筑单边布置(工况1)时, 广告牌面板在 0° , 45° 和 135° 风向角下的脉动风压系数分布等值线图. 由图可见: 各个风向角下, 面板1内外表面的脉动风压系数分布规律与平均风压系数分布规律均比较相近. 面板1外表面脉动风压系数的最大值为 0.25 左右. 面板1内表面的脉动风压系数分布在 0° 风向角时, 其值均为 0.14 左右; 45° 风向角时, 面板中部靠近迎风边缘(B端)处出现较大值, 达到 0.35 左右; 135° 风向角时, 最大值出现在迎风边缘(B端)处, 达到 0.3 , 并且在面板中部偏后区域也出现较大值, 达到 0.28 左右.

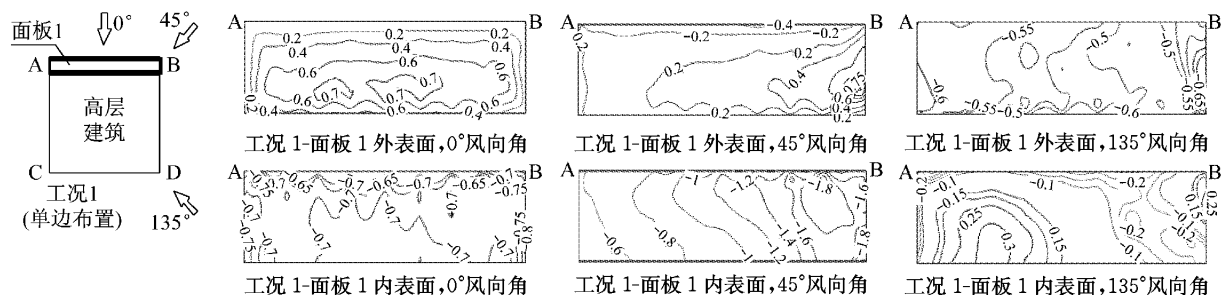


图3 屋顶广告牌沿高层建筑单边布置时平均风压系数分布

Fig.3 Mean wind pressure coefficient distributions on unilateral billboards

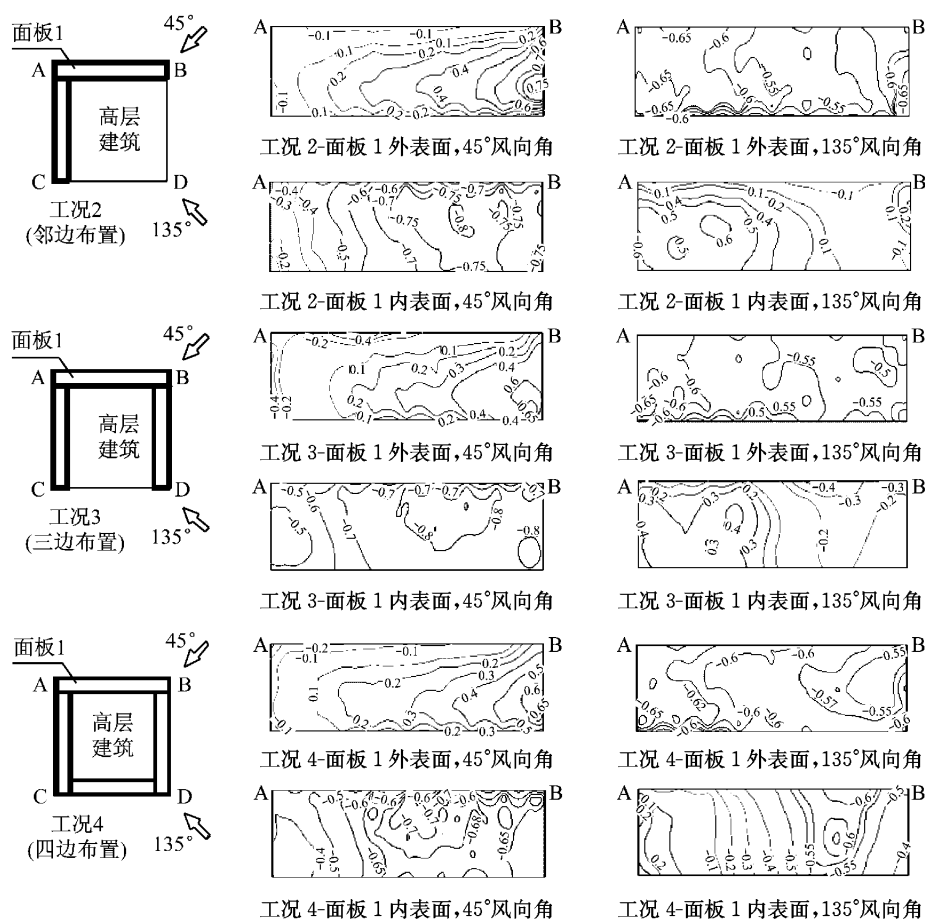


图4 屋顶广告牌沿高层建筑邻边、三边及四边布置时平均风压系数分布

Fig.4 Mean wind pressure coefficient distributions on adjacent, trilateral and peripheral billboards

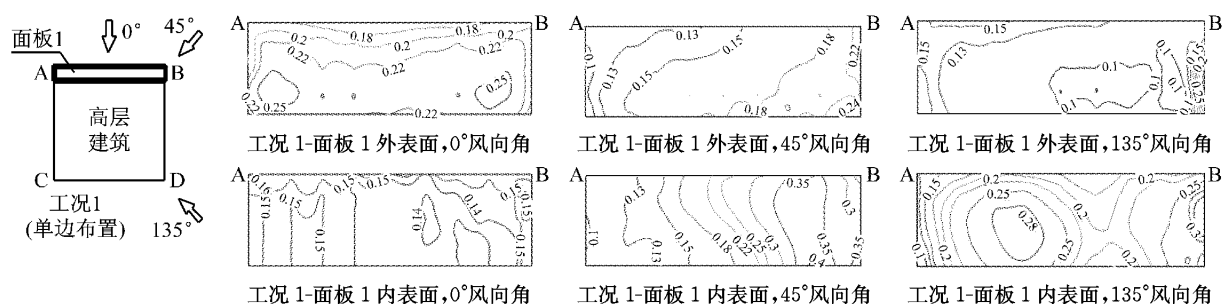


图5 屋顶广告牌沿高层建筑单边布置时脉动风压系数分布

Fig.5 Fluctuating wind pressure coefficient distributions on unilateral billboards

图6是高层建筑屋顶广告牌沿建筑邻边布置(工况2)、三边布置(工况3)、四边布置(工况4)时,广告牌面板1在45°和135°风向角下的脉动风压系数分布等值线图。从图中可以看出:45°风向角时,各个工况下的面板1外表面迎风前缘(B端)均出现较大的脉动值,并且沿着面板长边方向,脉动能量逐渐衰减,因而其脉动值逐渐减小。此时,面板1内表面的脉动风压系数值均较小;135°风向角下,随着工况的变化,面板1内表面的脉动风压系数分布出现了较为显著的变化。随着工况号的增大,面板1内表面

中部靠近B端的脉动风压系数值逐渐减小,这主要是由于新增加的面板对于来流的遮挡效应造成的;此时,面板中部靠近A端的脉动风压系数值有所增大,此处易产生局部振动。

图7给出了0°,45°和135°风向角下,面板1内外表面典型测点处的脉动风压系数功率谱。图中, f 为频率, $S_{cp}(f)$ 为脉动风压系数功率谱, σ_{cp} 为脉动风压系数方差, B 为广告牌宽度, U_H 为广告牌顶部处平均风速;1E-28代表的是面板1外表面的28号测点,1I-28代表的是面板1内表面的28号测点,其他

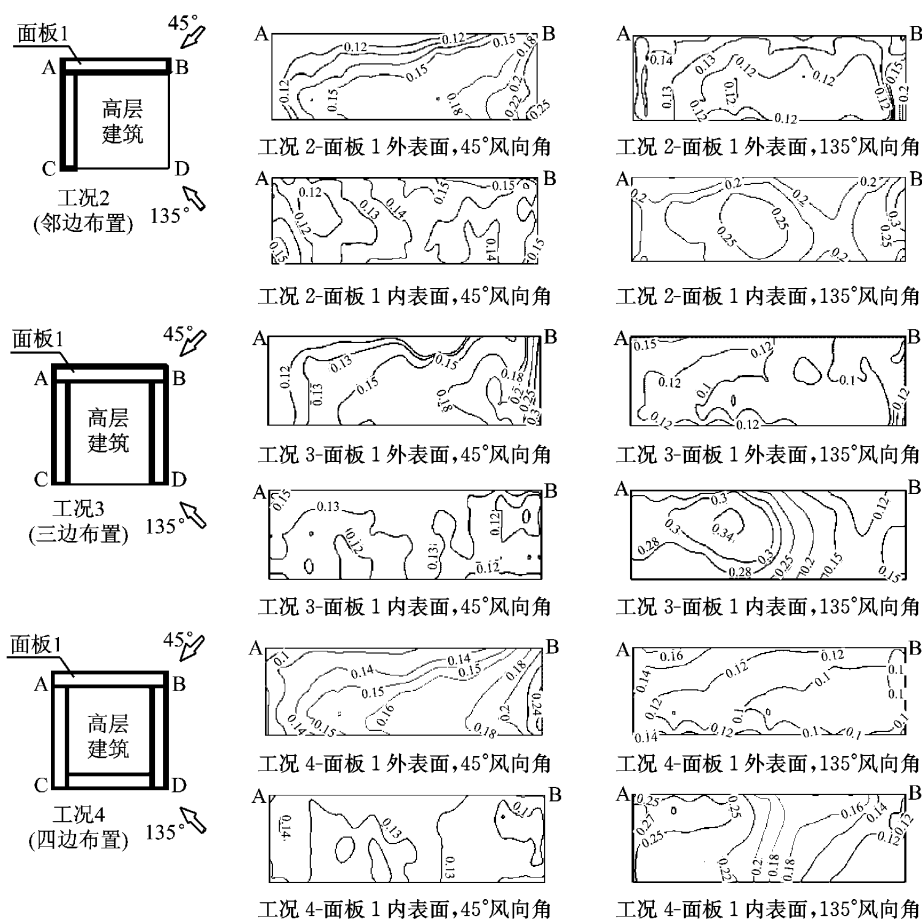


图6 屋顶广告牌沿高层建筑邻边、三边及四边布置时脉动风压系数分布

Fig.6 Fluctuating wind pressure coefficient distributions on adjacent, trilateral and peripheral billboards

测点意义与此类似,测点位置见图2b所示。由图7a, b可得:0°风向角下,各个工况的面板1内外表面(测点1I-28,1E-28)脉动风压系数功率谱的谱型均比较接近,能量较大,均有一个比较明显的峰值。为便于显示,图中仅列出工况1与工况4的功率谱,其他工况的功率谱与它们相近。

图7c, d对比了45°斜风时,面板1外表面迎风前缘(B端)、迎风后缘(A端)是否存在相邻广告牌面板对典型测点脉动风压系数功率谱的影响。由图7c可知:相比工况2,由于工况3(三边布置)的面板1迎风前缘(B端)处存在面板3(见图2),影响了来流在面板1边缘的绕流特性,导致其脉动风压的能量更大,且更为集中。由图7d可知:相比工况1,由于工况2(邻边布置)的面板1在迎风后缘(A端)处存在面板2,导致其脉动风压能量更大,并且在很窄的折减频率范围内出现两个较大峰值。

图7e, f对比了135°斜风时,4种工况的面板1外表面典型测点的脉动风压系数功率谱。由图可知,135°斜风时,由于来流在建筑物屋顶边缘或广告牌面板边缘的分离特性明显不同,导致各个工况下的

脉动风压功率谱有较大差异。各个工况下的脉动风压功率谱,均出现两个较为明显的峰值,工况1, 2, 3在低频处的峰值能量大于高频处峰值能量。相比之下,工况4的高频处出现较大能量。

2.3 面板表面极值风压系数分布

图8给出了各个工况下考虑面板1内外表面风压叠加效应的最不利正负风压系数等值线图。对比图8a和图8b可以看出,由于工况2的面板1在A端存在面板2(见图2),使得其表面的最不利正负风压系数都有不同程度的减小。再来对比图8b和图8c,由于工况3的面板1在B端存在面板3(见图2),使得其表面的最不利正负风压系数也有所减小,但是减小的程度不明显。对于广告牌沿建筑四周布置的工况4,其最不利正负风压系数的变化梯度较为明显,但是相比其他工况,其值均较小。为了更确切地给出数值,表1给出了各个工况下面板1表面的最大最不利正负风压系数。从表中可以很直观地看出,随着工况号的增加,面板1表面的最大最不利正风压系数从4.58减小到2.58,其最大最不利负风压系数从-3.44减小到-2.03。

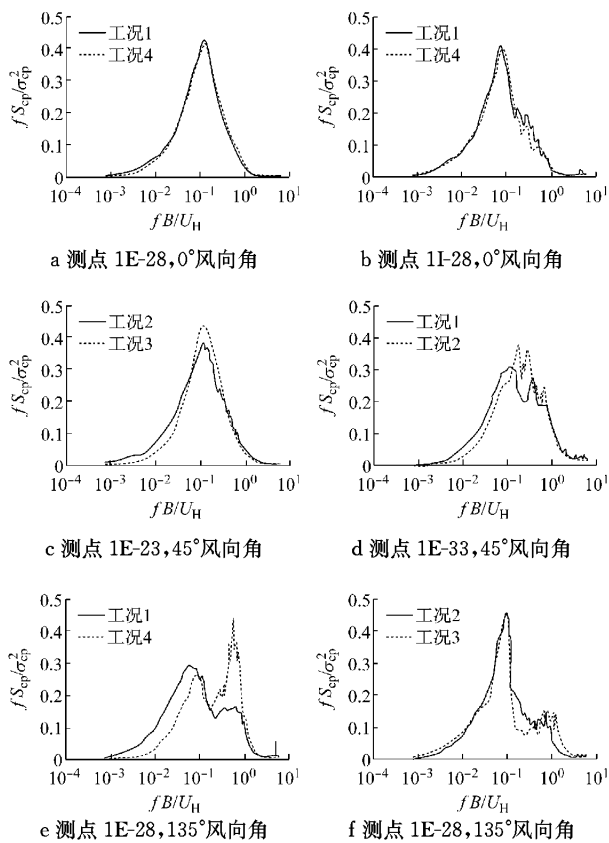


图 7 典型测点脉动风压功率谱

Fig.7 Fluctuating pressure coefficients spectra on typical taps

表 1 各种工况下面板 1 表面的最大最不利正负压系数
Tab.1 The largest worst peak pressure coefficients on Panel.1 of various conditions

工况类别	最大最不利正风压系数	最大最不利负风压系数
工况 1	4.58	-3.44
工况 2	3.28	-3.32
工况 3	2.77	-2.36
工况 4	2.58	-2.03

3 结论

(1) 对于广告牌沿高层建筑屋顶单边布置情况,斜风时,广告牌面板表面的平均风压系数绝对值均比较大,并且面板边缘附近的平均风压系数绝对值要比面板其他区域大。脉动风压场的整体分布与平均风压场分布规律类似。

(2) 当广告牌沿高层建筑屋顶邻边布置、三边布置及四周布置时,面板表面的平均风压系数绝对值相比单边布置时均有不同程度的减小,尤其是面板边缘附近的平均风压系数绝对值有较为显著的减小。此时相邻广告牌面板间夹角处附近的脉动风压较大,易产生局部振动。

(3) 广告牌在建筑屋顶不同的布置方式,导致

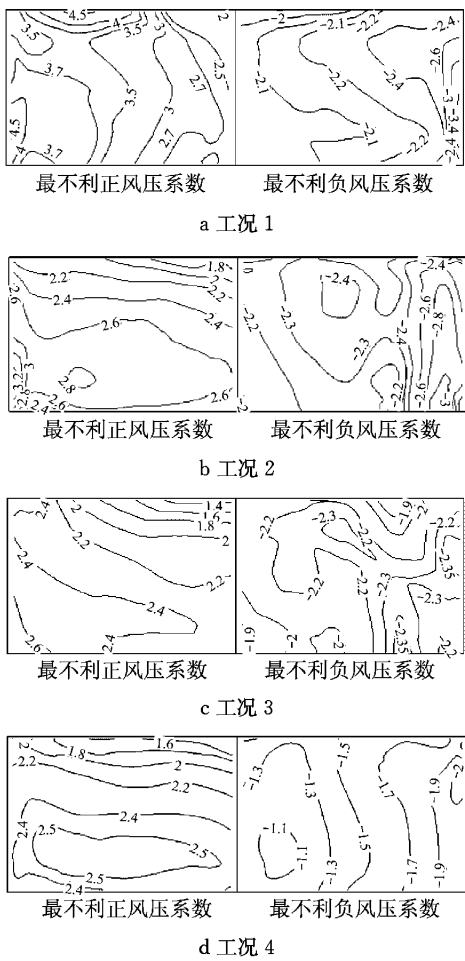


图 8 4 种工况下面板 1 表面在所有风向角下的最不利正负压系数等值线图

Fig.8 Worst positive and negative peak pressure coefficient distributions on Panel.1 over four conditions

其面板表面的最大最不利正负压系数是不同的。随着屋顶广告牌数量的增加,其面板表面的最大最不利正风压系数从 4.58 减小到 2.58,其最大最不利负风压系数从 -3.44 减小到 -2.03。

(4) 来流方向垂直于广告牌面板时,广告牌沿建筑屋顶的不同布置形式,其面板表面的脉动风压系数功率谱谱型均比较相近。来流方向与广告牌面板斜交时,则有所差异,主要表现在邻边广告牌面板的存在会使另一块面板表面的脉动风压功率谱能量变大,并且更加集中。

参考文献:

[1] Letchford C W, Holmes J D. Wind loads on free-standing walls in turbulent boundary layers [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 51(1): 1.
[2] Letchford C W. Wind loads on rectangular signboards and

- hoardings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(2): 135.
- [3] Paulotto C, Ciampoli M, Augusti G. Wind tunnel evaluation of mean wind pressure on a frame-type signboard [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94(5): 397.
- [4] Warnitchai P, Sinthuwong S, Poemsantitham K. Wind tunnel model tests of large billboards [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2009, 12(1): 103.
- [5] 金新阳, 金海, 扬伟, 等. 户外独立柱广告牌风荷载的数值模拟研究[J]. *工业建筑*, 2007, 37(增1): 383.
JIN Xinyang, JIN Hai, YANG Wei, *et al.* Numerical investigation of wind load on single column supported billboard [J]. *Industrial Construction*, 2007, 37(Suppl. 1): 383.
- [6] 秦云, 张耀春, 王春刚. 数值风洞模拟结构静力风荷载的可行性研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, 36(12): 1593.
QIN Yun, ZHANG Yaochun, WANG Chungang. Feasibility study about numerical wind tunnel in the simulation of static wind loads on buildings [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004, 36(12): 1593.
- [7] 沈之容, 李冰心. 楼顶广告牌结构基本自振周期计算方法研究[J]. *建筑结构*, 2012, 42(3): 75.
SHEN Zhirong, LI Bingxin. Research on calculation method of basic natural vibration period of roof billboard structure [J]. *Building Structure*, 2012, 42(3): 75.
- [8] 中国建筑科学研究院. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
China Academy of Building Research. GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [9] Davenport A G. Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1964, 28(2): 187.

(上接第1158页)

- [3] 熊祚森, 杨林德, 黄宏伟. 水泥土复合式支挡结构的机理分析[J]. *土木工程学报*, 1997, 30(5): 43.
XIONG Zuosen, YANG Linde, HUANG Hongwei. Analysis of the mechanism of cement-soil composite retaining structure [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1997, 30(5): 43.
- [4] 黄广龙, 惠刚, 方乾, 等. MC桩组合支护结构设计与应用研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(9): 2697.
HUANG Guanglong, HUI Gang, FANG Qian, *et al.* Design of MC composite retaining structure and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(9): 2697.
- [5] 阮伟光. 水泥土挡墙加钻孔灌注桩组合体的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
RUAN Weiguang. Study on the combination of cement-soil retaining wall and bored piles[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2005.
- [6] 宰金璋, 朱百里. 水泥土挡墙的变形及其计算[C]//第四届全国地基处理学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1995: 529-533.
ZAI Jinzhang, ZHU Baili. Cement-soil retaining wall deformation and its calculation[C]// *Proceedings of Fourth National Conference on Foundation Treatment*. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1995: 529-533.
- [7] 陆瑞明, 李红. 水泥土挡墙的空间作用研究[J]. *工程勘察*, 1997(1): 1.
LU Ruiming, LI Hong. The study of space effect of the cement-soil retaining wall[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 1997(1): 1.
- [8] 王卫东, 王浩然, 黄茂松, 等. 水泥土重力式围护结构水平变形简化计算方法[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(6): 814.
WANG Weidong, WANG Haoran, HUANG Maosong, *et al.* Simplified calculation method of lateral deformation of gravity retaining wall [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2011, 39(6): 814.
- [9] 杨敏, 熊巨华. 水泥土围护结构的稳定性与变形分析[C]//中国土木工程学会第八届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 万国学术出版社, 1999: 647-650.
YANG Min, XIONG Juhua. The stability and deformation analysis of the cement-soil retaining structure [C]// *Proceedings of the 8th Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Conference of China Civil Engineering Society*. Beijing: International Academic Publishers, 1999: 647-650.
- [10] Randolph M F, Wroth C P. An analysis of the vertical deformation of pile groups[J]. *Geotechnique*, 1979, 29(4): 423.
- [11] Kraft L M, Kagawa T, Ray R P. Theoretical t - z curves[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1981, 107(11): 1543.
- [12] Brinkgreve R B J, Swolfs W M. Plaxis 3D foundation version 2 user's manual[Z]. Delft: Plaxis BV, 2007.
- [13] 朱家祥. 深基坑工程中混凝土芯水泥土桩水平承载机理与变形特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
ZHU Jiaxiang. Pile horizontal bearing mechanism and deformation characteristics of concrete-cored pile in excavation [D]. Nanjing: Haohai University, 2008.
- [14] 贾坚. 影响水泥土强度的综合含水量研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2006, 2(1): 132.
JIA Jian. Research on comprehensive water content of cement treated soil [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(1): 132.