

大型户外独立柱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: 通过风洞试验, 测量三面板和双面板两种独立柱广告牌模型的面板表面风压, 研究其分布规律. 讨论面板表面平均和脉动风压系数在不同风向角下的分布特性及随风向角的变化, 以及面板表面典型测点脉动风压的频域特性. 结果表明: 各块面板表面的平均风压系数绝对值均随风向角的增加而逐渐减小; 对于背风面板, 面板边缘附近的平均风压系数绝对值及脉动风压系数要比面板内部区域大; 在各个风向角下, 单个面板两表面均存在风压的叠加或抵消效应; 迎风面板外表面的脉动风压主频低于背风面板外表面脉动风压的主频, 能量也较小, 各块面板的内表面脉动风压频带均较宽, 能量更小; 广告牌立柱对于面板表面局部风压系数的影响较大.

关键词: 独立柱广告牌; 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 Large Single Column Supported Billboards

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 distribution characteristics on two-panel and three-panel billboards supported by single column were studied with wind tunnel model tests. The distribution characteristics of mean and fluctuating wind pressure coefficients in different wind directions, the influences of different wind directions on mean and fluctuating wind pressure coefficients 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 absolute values of mean wind pressure coefficients on each panel decrease with the increase of wind direction; the absolute values of mean wind pressure coefficients and fluctuating wind pressure coefficients near the edge of leeward panels are larger than those on the interior

areas of leeward panels; either the superimposition or offset of the wind pressure exists on both surfaces of a single panel in various approaching directions; the main frequency of fluctuating wind pressure spectra of the outside surface of windward panel is lower than that of internal surface of leeward panel, and so is the energy. In comparison, the bandwidth of fluctuating wind pressure spectra of internal surfaces of panels are wider and the energies are lower; the local wind pressure coefficients on the surfaces of panels are greatly influenced by the columns of billboards.

Key words: single column supported billboards; wind tunnel test; wind pressure distribution; power spectra

城市户外广告牌是城市中户外媒体的主要组成部分, 在给广告商、销售商带来经济利益的同时, 在大风环境中的安全问题不容忽视. 特别是近年来, 大风刮倒广告牌事件时有发生, 造成了很大的人员伤亡和财产损失, 严重影响了城市的安全运行. 独立柱广告牌主要有三面独立柱广告牌和双面独立柱广告牌两种. 风荷载是独立柱广告牌结构设计时的主要荷载, 但是目前对其研究仍然相对不足.

一种有效实用并且可以获得作用于广告牌上的风荷载的方法就是对缩尺广告牌模型进行风洞试验研究. 早在 1932 年, Flashbart 就对矩形平板及独立墙体的阻力系数进行了研究, 不过他的成果是在光滑均匀流场中获得的^[1]. Bearman^[2], Letchford 和 Holmes^[3], Letchford^[4]采用风洞试验对处于湍流边界层内的独立墙体或悬空矩形平板上的风荷载进行了研究. Paulotto 等^[5]采用模型风洞试验测量了一种框架式单面板广告牌表面的平均风压, 考察了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^[6]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, 得到

两种广告牌型式的平均阻力系数及扭矩系数值。相比于国外学者的工作,国内学者在这方面的研究工作相对滞后,研究方法也比较单一。金新阳等^[7]、秦云等^[8]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。基于这种现状,我国现行的荷载规范^[9]中还没有这类结构的风载体型系数的规定。

从以上介绍可以看出,国外对于广告牌研究开展较早,且模型风洞试验均是研究的主要手段。但是早期学者的研究工作主要针对独立墙体或者单面板广告牌开展,并且主要关心用于结构设计的阻力系数及扭矩系数。近年来有学者^[6]对双面板广告牌开展研究,但采用的是高频天平技术,不能获得面板表面风压的分布特性。而对于我国户外较常采用的三面板广告牌的风压和风力研究则鲜有报道。因此开展针对于国内典型风灾易损广告牌的风洞试验研究十分必要。本文采用刚性模型表面测压风洞试验,对大型户外双面和三面独立柱广告牌面板表面的风压分布特性进行研究,可以为相关规范修订以及工程技术人员结构设计时提供参考。

1 试验简介

1.1 风洞及风场模拟

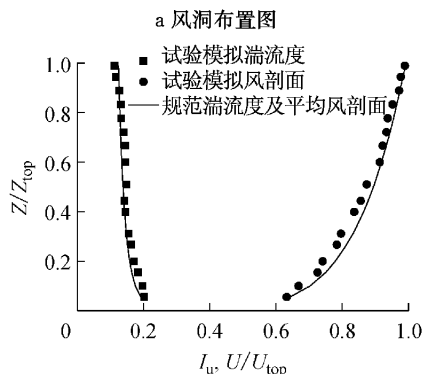
本试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室的 TJ-2 大气边界层风洞中进行。该风洞为闭口回流式矩形截面风洞,试验段尺寸为宽 3 m、高 2.5 m、长 15 m。试验风速范围为 $0.5 \sim 68.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。风压测量、记录及数据处理系统由电子式压力扫描阀系统、PC 机,以及自编的信号采集及数据处理软件组成。

独立柱广告牌大多架设在城市郊区、高速公路或铁路两旁,因此本次试验采用 B 类地貌(地面粗糙度)作为试验风场^[9]。风场模拟采用在试验段上游安置尖劈和粗糙元来实现,几何缩放比为 $1:25$,试验风速为 $13.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。B 类风场的平均风剖面指数为 0.15,高 10 m 处的名义湍流强度为 0.14^[9]。图 1 给出了 B 类风场的风洞布置情况、平均风速及湍流度剖面。图中: U 为风速, Z 为高度, U_{top} 为模型顶部风速, Z_{top} 为模型顶部高度, I_u 为湍流度。从图中可以看出,模拟值和理论值吻合较好,符合研究要求。

1.2 试验模型

独立柱广告牌的牌面尺寸主要为 $18 \text{ m} \times 6 \text{ m}$,总高度一般有 15, 18, 21 m 三类,但是尚应考虑地方市容管理方面的规定,如上海市规定独立柱广告牌高度不得大于 22 m,因此为了考虑最不利的情况,

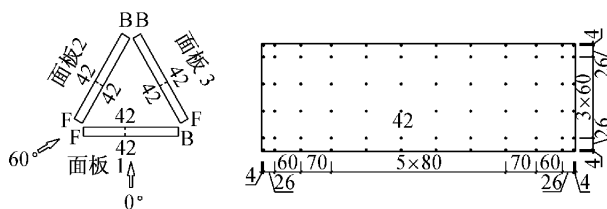
本次试验研究的独立柱广告牌的高度定为 22 m。模型尺寸及面板测点布置如图 2 所示。测点布置采取



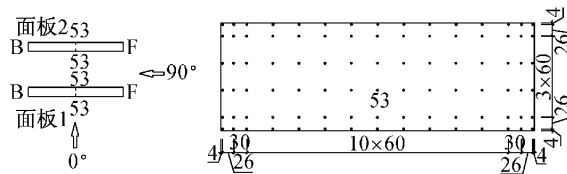
b 平均风速剖面和湍流度剖面

图 1 风洞中模拟的 B 类风场

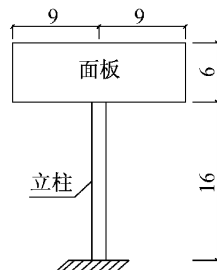
Fig.1 Simulated wind field for terrain category of B



a 三面独立柱(单位:mm)



b 双面独立柱(单位:mm)



c 独立柱广告牌原型(单位:m)

图 2 模型尺寸及测点布置图

Fig.2 Model configurations and locations of pressure taps

边密中疏、满布对称的方式. 双面广告牌单个面板表面布置 90 个测点, 总测点数为 $90 \times 4 = 360$ 个; 三面广告牌单个面板表面布置 72 个测点, 总测点数为 $72 \times 6 = 432$ 个. 根据对称性及所研究对象的特性, 双面广告牌试验风向角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 以 7.5° 为增量, 共 13 个风向角; 三面广告牌试验风向角在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 之间, 以 7.5° 为增量, 共 9 个风向角.

本次试验中, 测压信号采样频率为 312.5 Hz, 每个测点采样 63 000 个数据, 对应采样时间为 201.6 s, 实际采样时长约为 28 min.

1.3 试验数据处理方法

面板表面风压用量纲一化的压力系数表示为

$$\bar{C}_{pi} = (\bar{p}_i - p_0) / 0.5 \rho \bar{u}_h^2 \quad (1)$$

$$C'_{pi} = \sigma_{pi} / 0.5 \rho \bar{u}_h^2 \quad (2)$$

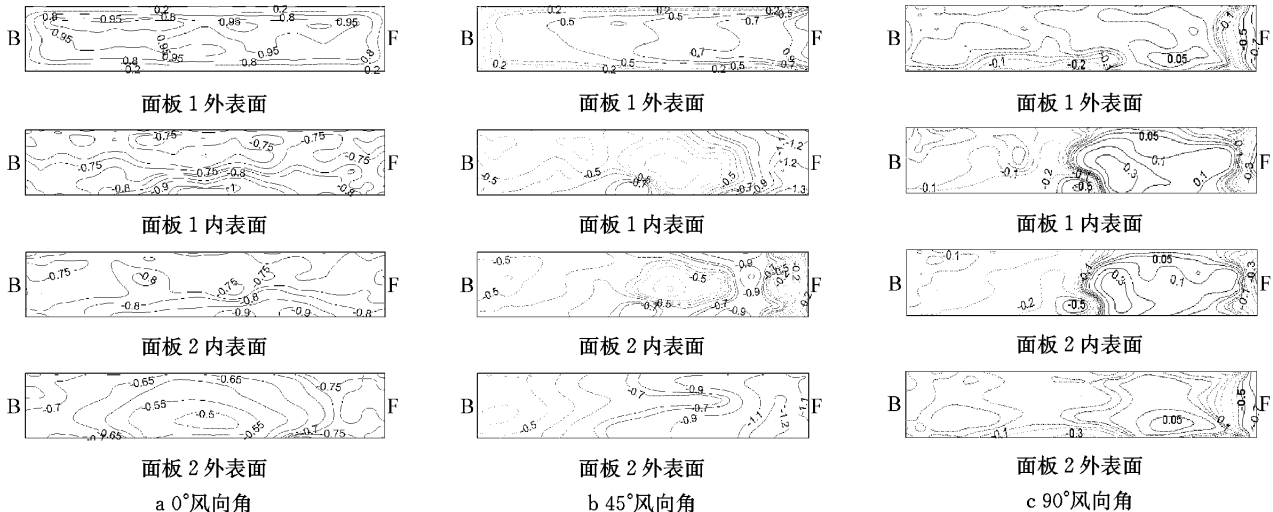


图3 双面独立柱广告牌平均风压系数分布

Fig.3 Distribution of mean wind pressure coefficients on two-panel billboard

从图中可以看出: ① 风向角为 0° 时, 面板 1 外表面的平均风压系数均为正值, 而面板 1 的内表面及面板 2 内外表面的平均风压系数均为负值. 正压区压力系数呈对称分布, 面板中部压力系数较大, 其值为 0.95 左右; 面板边缘处压力系数较小, 在 0.2 左右. 而对于负压区, 面板 1 内表面与面板 2 内表面压力系数分布相近, 其值均在 $-0.75 \sim -0.80$ 左右. 面板 2 的外表面压力系数分布从中部 -0.50 向边缘处增大至 -0.75 左右, 变化梯度不如正压区显著. 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, 并且此时正值比 0° 风向角时有所减小, 分布也不均匀, 其值从迎风前缘处的 0.9 逐渐减小至后缘的 0.2 左右. 此时, 面板的其他表面仍然呈现为负压, 并且在面板前缘较窄区域出

式中: $\bar{C}_{pi}$ 为面板表面某测点的平均风压系数; $\bar{p}_i$ 为测点的平均风压值; C'_{pi} 为测点的均方根脉动风压系数; p_0 为静止大气压; ρ 为空气密度; σ_{pi} 为均方根脉动风压; $\bar{u}_h$ 为参考高度处平均风速, 参考高度取面板中心高度. 压力系数为正表示垂直表面的风压为压力, 压力系数为负表示吸力. 下文如无特别说明, 凡涉及负压值的大小均为其绝对值的大小.

2 结果及分析

2.1 平均风压系数分布

图 3 是双面单立柱广告牌面板在 $0^\circ, 45^\circ$ 和 90° 风向角下的平均风压系数分布等值线图. 图上, F 代表面板相对来流风方向的前缘, B 代表后缘.

现较大的负压值, 最大达到 -1.3 . 说明斜风时, 来流风在面板 1 前缘分离剧烈, 此时面板边缘维护结构容易受到破坏, 结构设计时应该引起注意. ③ 90° 风向角时, 风向与面板平行, 所有面板表面除少数区域出现正压外, 大部分都呈现负压, 并且分布都比较相近. 此时, 在面板迎风边缘处出现较大的流动分离, 面板外表面前缘压力系数值为 $-0.5 \sim -0.7$, 面板内表面前缘压力系数值在 $-0.1 \sim -0.3$. 需要注意的是, 在各个风向角下, 面板 1 对面板 2 有遮挡作用, 面板 1 外表面主要受压、内表面主要受吸, 风压相互叠加; 而面板 2 的内外表面均主要受吸力作用, 表现为风压相互抵消; 此外, 当风向角从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化时, 面板 1 和面板 2 内表面中下部区域均出现较大的负压值, 这主要由于广告牌立柱对于来流风的

干扰作用引起的。

图4是三面独立柱广告牌面板在 0° 、 30° 和 60° 风向角下的平均风压系数分布等值线图。从图中可以看出:① 0° 风向角时,面板1内外表面平均风压系数分布与双面单立柱 0° 风向角时面板1内外表面的压力系数分布基本一致。面板2与面板3的内外表面都为负压,并且关于来流风方向对称分布,都在面板中部靠近迎风边缘处取得最大负压值 -0.8 。② 30° 斜风时,面板1外表面的平均风压分布与双面广告牌斜风时的相近,但是其内表面的平均风压系数小于双面广告牌斜风时的平均风压系数,这主要是由于面板2的遮挡效应造成的。面板2外表面前缘处出现较大负压,达到 -1.0 ,说明此处来流分离较为剧烈,结构设计时,应考虑该处围护结构的安全性问题。面板3内表面的风压分布比较紊乱,既有正压也有负压,最大负压达到 -0.7 ,最大正压达到 0.3 。相比之下,面板3外表面的平均风压分布则均匀得多,其值在 -0.55 左右。③ 60° 风向角时,面板1与面板2内外表面的平均风压分布关于来流方向呈对称分布,外表面都承受正压,其值从迎风边缘处的 0.5 逐渐减小至后缘的 0.2 左右;内表面主要承受负压的作用,其值从前缘的 -0.7 减小到中后部的 -0.1 ,并且在后缘极小范围内出现正压值。面板3内表面的平均风压对称分布,面板中部承受正压,面板边缘承受负压,最大正压出现在面板中上部,达到 0.6 。这主要是由于来流在面板1与面板2间的狭缝产生高速分离的间隙流,一部分直接打在面板中部,因此在中上部产生较大正压,而中下部由于有立柱的阻挡,正压值较小;另一部分则在面板3与面板1、面板2间的狭缝产生了二次分离,因此面板边缘处出现负压。与双面单立柱一样,在各个风向角下,必须考虑各块面板内外表面间的风压叠加或者抵消效应。

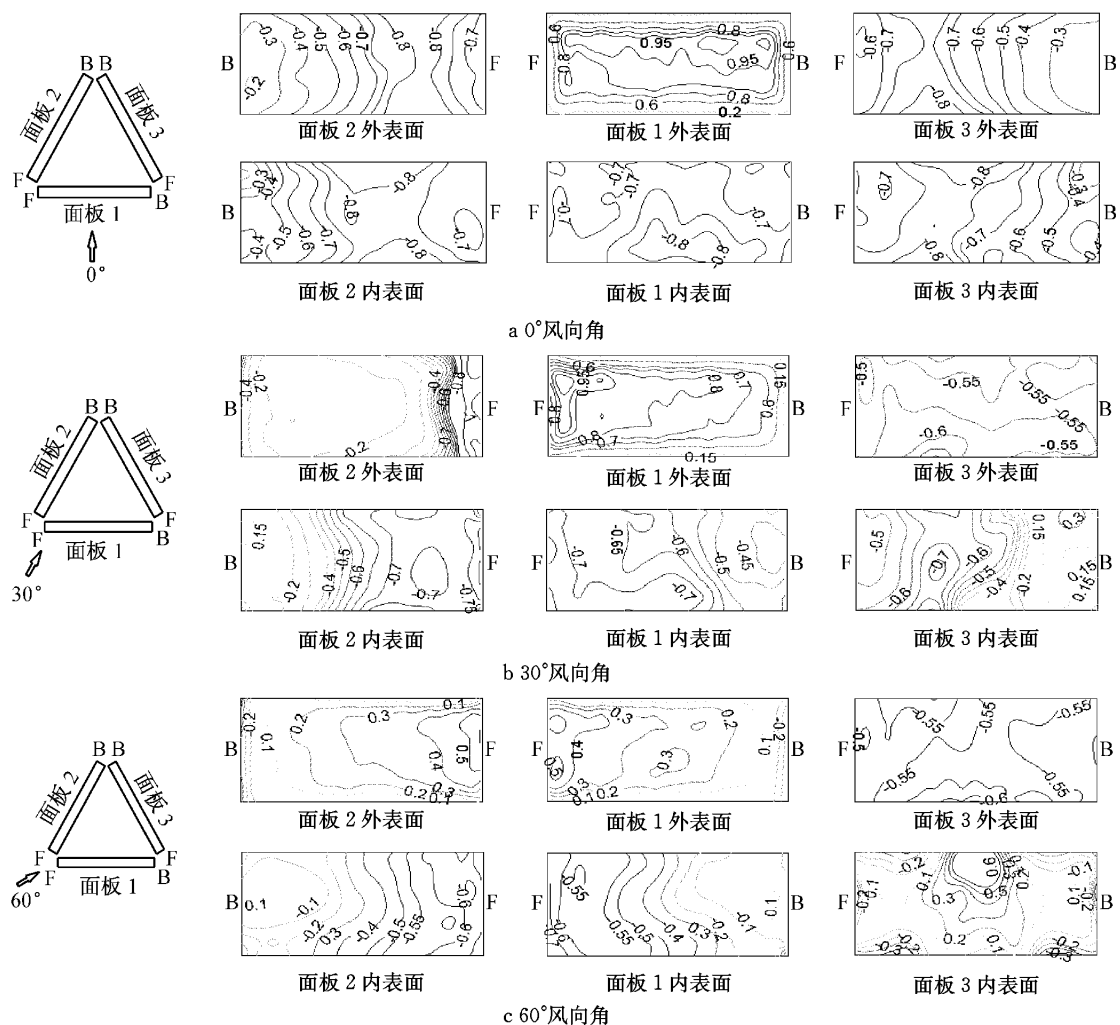


图4 三面独立柱广告牌平均风压系数分布

Fig.4 Distribution of mean wind pressure coefficients on three-panel billboard

2.2 脉动风压系数分布

脉动风荷载可能导致结构振动并造成疲劳破坏,也可能产生很大的吸力导致面板维护结构的倾覆破坏,因此,脉动风压场的分析对结构设计非常重要。

图5为双面独立柱广告牌各面板在 0° 、 45° 和 90° 风向角下的脉动风压分布等值线图。从图中可以看出:① 0° 风向角下,迎风面板外表面的脉动风压系数分布较对称,最大值为0.22左右,出现在迎风面板左右边缘区域。面板1内表面与面板2内表面分布比较一致,大部分区域脉动风压系数为0.1左右,只有在中下部很小范围内出现较大的脉动值,达到0.2左右,这是由于立柱的干扰所致。在进行实际结

构设计时特别要重视立柱周围维护结构的疲劳问题。面板2外侧的压力系数分布也比较均匀,其值在0.10~0.15。② 45° 斜风时,来流在面板前缘分离较为剧烈,因而在各块面板前缘均出现较大脉动值,最大可达到0.28。而在下风向区域,由于脉动能量的衰减,脉动风压系数逐渐减弱,其分布特征与平均风压分布特征类似。③ 90° 风向角时脉动风压分布特征与 45° 斜风时分布特征相近,区别在于气流在前缘处分离更为显著,并且在面板外表面前缘较内表面产生了更为剧烈的漩涡脱落现象,其最大值可达到0.34左右。此外,在下风向区域,脉动能量的衰减要比斜风时快得多。

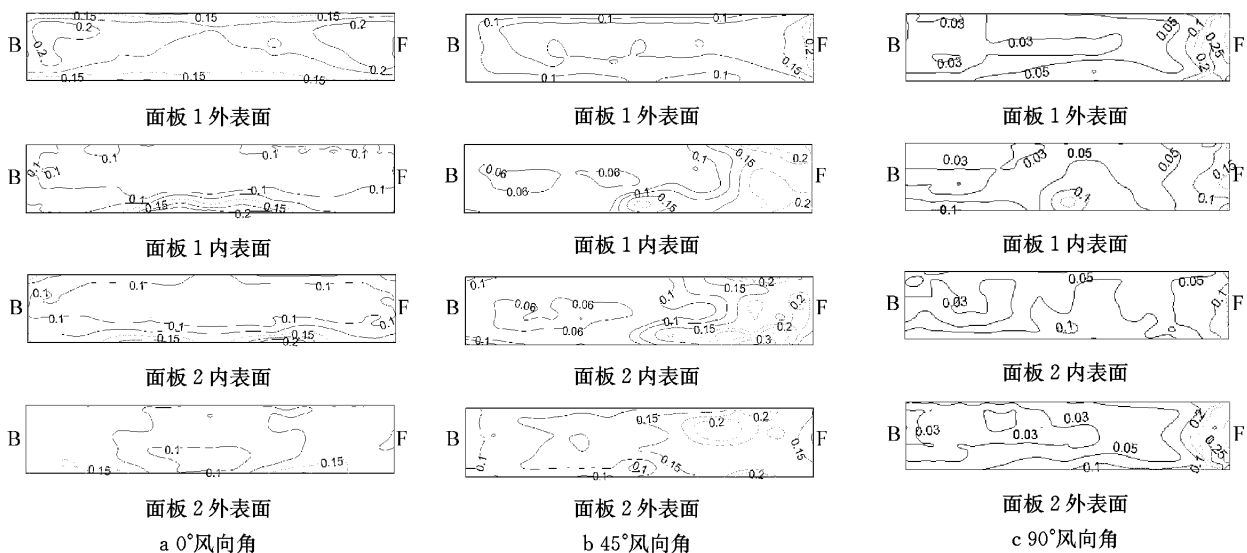


图5 双面独立柱广告牌脉动风压系数分布

Fig.5 Distribution of fluctuating wind pressure coefficients on two-panel billboard

图6为三面独立柱广告牌各面板在 0° 、 30° 和 60° 风向角下的脉动风压分布等值线图。从图中可以看出:① 0° 风向角下,面板1外表面的脉动风压分布与双面广告牌面板1外表面的分布基本一致,其内表面的则小得多。面板2与面板3的外表面脉动风压系数分布比较平均,主要在0.15左右,在极小的角部区域内会出现0.20~0.25;其内表面的分布则比较紊乱,并且后缘处的脉动风压系数大于前缘,后缘角部上端脉动风压系数最大可达到0.37。这主要是由于在面板1与面板2、面板3间的狭缝形成的高速间隙流在面板2与面板3间的狭缝产生二次分离,并且与从面板1上缘分离的尾流混合作用的结果。因此,在三面广告牌结构设计时,应特别注意面板夹角处的围护结构疲劳破坏问题。② 30° 斜风时,各面板表面的脉动风压系数分布特征与平均风压分布

特征基本一致。此时,在面板3内表面靠近后缘附近出现很大的脉动值,其最大值达到0.38,并且脉动值大于0.25的区域很大,作用机理和前相同。③ 60° 风向角时,面板1与面板2除外表面迎风边缘处出现较大脉动风压值外,其他位置处的脉动风压值均较小,在0.1左右。此时,由于广告牌立柱的干扰效应,导致立柱两侧面板3的内表面出现较大脉动风压系数,达到0.2~0.3,而远离立柱的位置,脉动风压系数数值则较小。

2.3 典型测点的风压系数与风向角关系

选取三面和双面广告牌面板中部位置处的典型测点来定量比较各块面板表面风压系数随风向角的变化规律,如图7所示(测点编号及位置见图2)。其中,1E-53代表的是面板1外表面的53号测点,1I-53代表的是面板1内表面的53号测点,其他编号意

义与此类似。

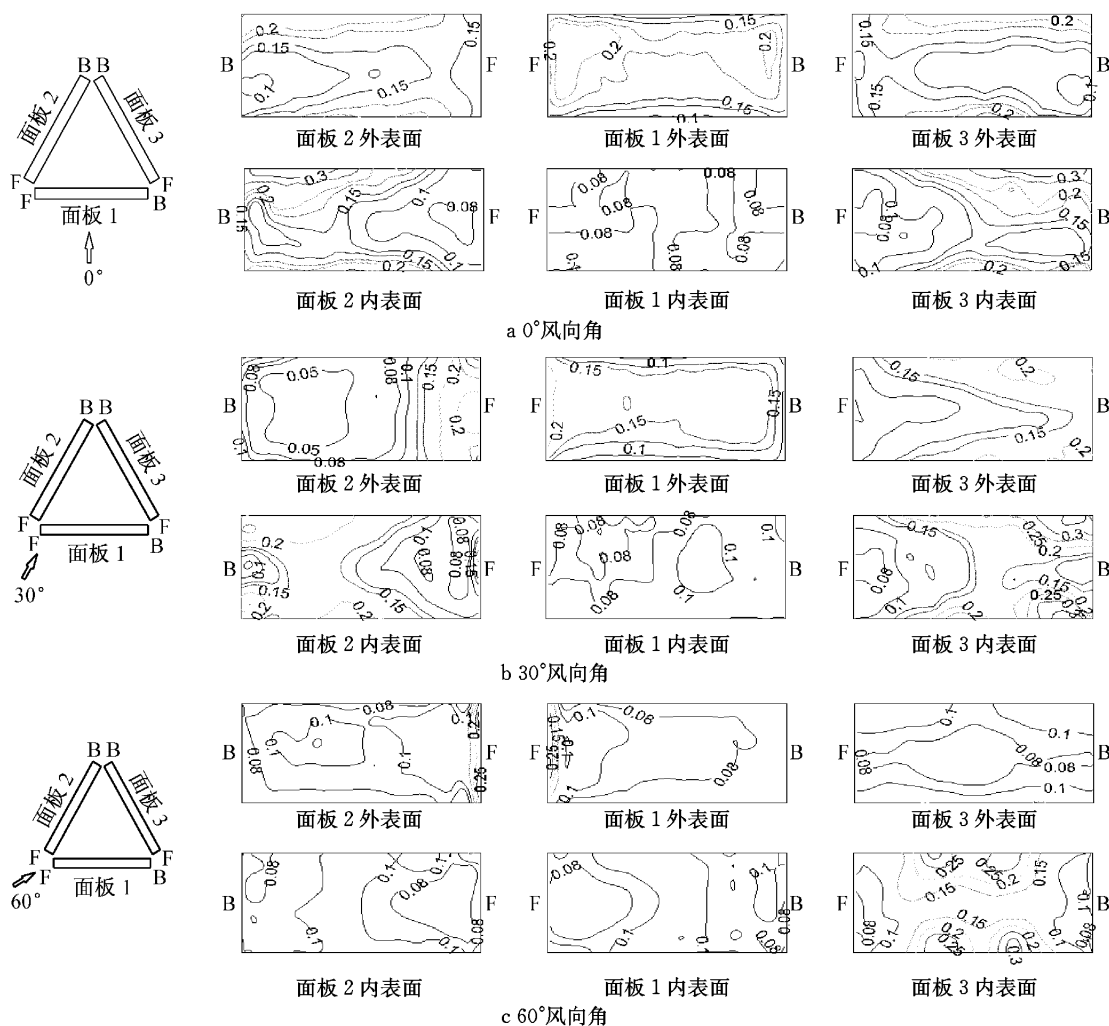


图6 三面独立柱广告牌脉动风压系数分布

Fig.6 Distribution of fluctuating wind pressure coefficients on the three-panel billboard

对于双面广告牌,图中结果表明:① 面板1外表面(测点1E-53)始终处于正压区,平均风压系数和脉动风压系数均随着风向角的增加而逐渐变小。② 在各个风向角下,面板1内表面(1I-53)与面板2内表面(2I-53)的平均风压系数和脉动风压系数均比较接近。平均风压系数在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 风向角时为负值,并且在 15° 时取得最大负值; $>60^\circ$ 时出现正值,并且其值随着风向角的增加而增大,这主要是由于面板较宽,当风向角 $>60^\circ$ 时,来流在面板前缘分离产生漩涡再附的结果。脉动风压系数则随风向角的增加先增大后减小。③ 面板2外表面(2E-53)始终为负压,其平均风压系数和脉动风压系数值均随风向角的增加先增大后减小,最大平均风压系数出现在 45° 风向角,最大脉动风压系数出现在 52.5° 。

相比双面广告牌,三面广告牌风压系数变化规律有如下特点:① 三面板面板1内外表面(1E-42,1I

-42)的风压系数变化规律与双面板面板1内外表面风压系数变化规律一致。② 面板2外表面(2E-42)的平均风压系数在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时为负压,其随风向角的增大而减小;风向角 $>45^\circ$ 时为正压,并随风向角的增加而增大。而脉动风压系数随风向角的增加成波浪形变化,在 15° 时取得最大脉动值,而在 37.5° 时取得最小脉动值。③ 面板3内表面(3I-42)平均风压系数的变化规律与面板2外表面(2E-42)的平均风压系数变化规律一致,不同的是,面板3内表面在风向角 $>52.5^\circ$ 时出现正值。而其脉动风压值则随风向角增加略有增大。对于其他面板表面,风压系数随风向角增加有所变化,但变化幅度均不大。

2.4 典型测点的脉动风压系数功率谱分析

仍然选取上文的几个典型测点,通过量纲一化的脉动风压系数谱来考察广告牌各块面板表面脉动风压的频域特性。图8和图9分别给出了 0° 风向角

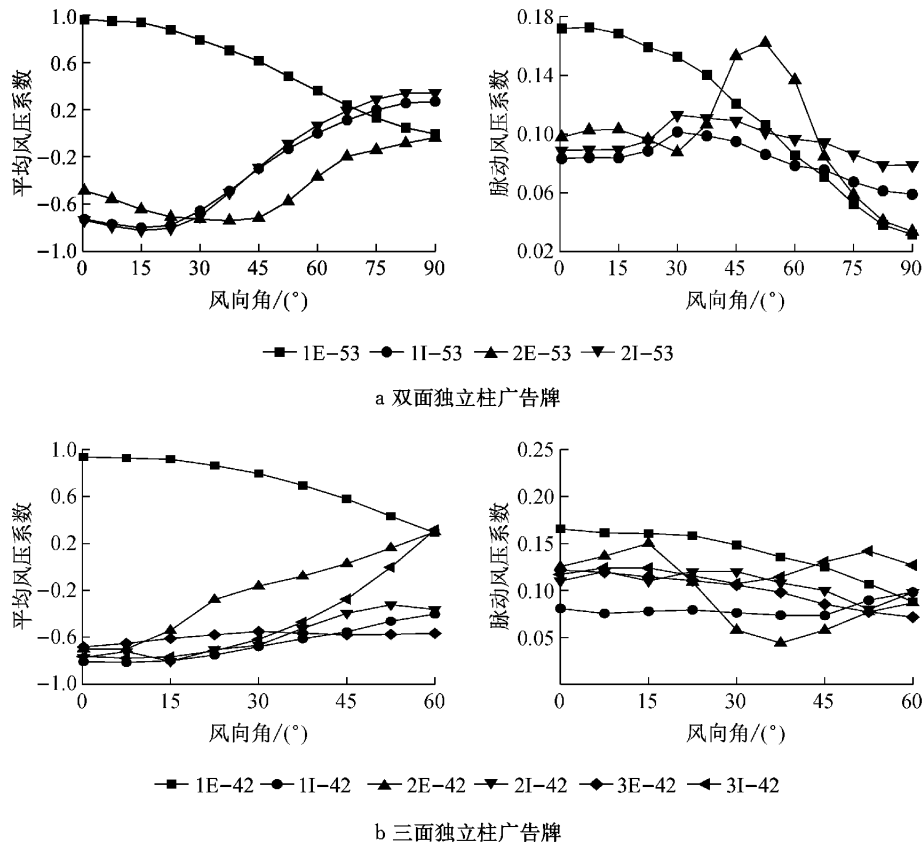


图7 典型测点风压系数随风向角变化曲线

Fig.7 Wind pressure coefficients on typical taps vs. wind directions

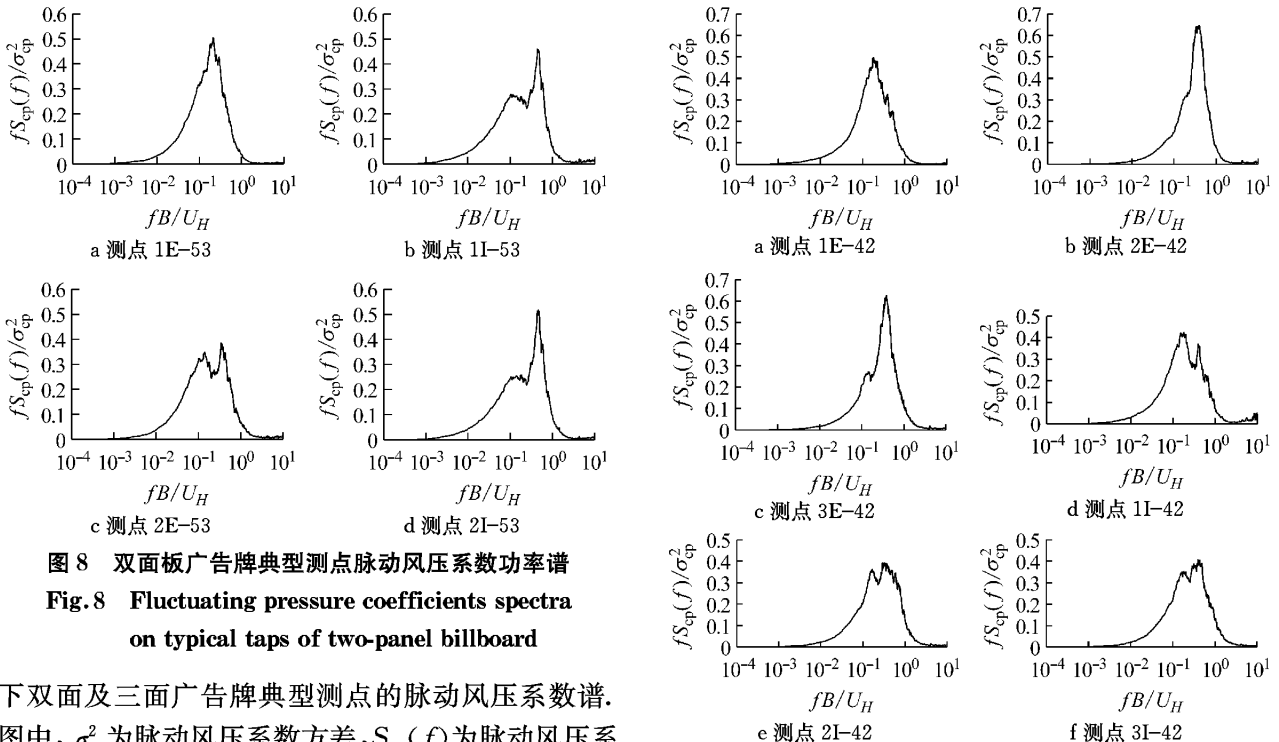


图8 双面板广告牌典型测点脉动风压系数功率谱
Fig.8 Fluctuating pressure coefficients spectra
on typical taps of two-panel billboard

下双面及三面广告牌典型测点的脉动风压系数谱。图中, σ_{cp}^2 为脉动风压系数方差, $S_{cp}(f)$ 为脉动风压系数功率谱, f 为频率, B 为广告牌面板宽度, U_H 为广告牌顶部处平均风速。由图可知: ① 对于双面板广告牌, 迎风面板外表面(1E-53)脉动风压的能量较

图9 三面板广告牌典型测点脉动风压系数功率谱
Fig.9 Fluctuating pressure coefficients spectra on
typical taps of three-panel billboard

大,并且主要集中在折减频率为0.2处;面板1内表面(1I-53)与面板2内表面(2I-53)的脉动风压系数的谱型相近,有两个峰值,折减频率在0.4附近出现较大峰值;此时,面板2外表面(2E-53)脉动风压的频率成分更丰富,能量也稍小。②与双面板广告牌相比,三面板广告牌面板2与面板3外表面(2E-42, 3E-42)的脉动风压主频更集中,能量也更大,峰值折减频率也在0.4附近;而各块面板的内表面(1I-42, 2I-42, 3I-42)由于受到面板间以及面板内部格构式钢构件的干扰,因而能量均较小。

3 结论

(1)对于双面及三面独立柱广告牌,在各个风向角下,各块面板表面的平均风压系数均随风向角的增加而逐渐减小;对于背风面板,面板边缘附近的平均风压系数要比面板内部区域大。脉动风压场的整体分布与平均风压场分布规律类似。

(2)三面板广告牌背风面板外表面脉动风压系数谱的主频高于迎风面板外表面脉动风压的主频,峰值处的频带更窄,能量更为集中;而各块面板的内表面由于受到面板间以及面板内部格构式钢构件的干扰,因而风压频带均较宽,能量均较小;双面板广告牌的脉动风压频域特性与三面板广告牌类似,不同的是,此时各块面板内表面出现较大峰值,而背风面板外表面脉动风压的能量相对较小。

(3)对于独立柱广告牌,立柱对于来流的干扰显著,立柱周围往往出现较大的脉动风压系数及绝对值较大的负压。

参考文献:

- [1] Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures[M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [2] Bearman P W. An investigation of the forces on flat plates normal to a turbulent flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 46(1): 177.
- [3] 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.
- [4] Letchford C W. Wind loads on rectangular signboards and hoardings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(2): 135.
- [5] 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.
- [6] Warnitchai P, Sinthuwong S, Poemsantitham K. Wind tunnel model tests of large billboards[J]. Advances in Structural Engineering, 2009, 12(1): 103.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.