

锥形涡诱导下建筑物顶面风荷载¹⁾

陈学锐 顾志福²⁾ 李 燕

(北京大学工学院, 北京 100871)

摘要 通过风洞模拟实验, 研究了在锥形涡诱导下建筑物顶面风荷载的特性. 针对一个立方体形模型, 给出了在不同风向角下压力分布的系统结果, 进而分析了产生这样结果的原因和流动机理, 以及建筑物顶面的分离流动结构随风向角改变而改变及其演化过程, 并指出锥形涡的出现是建筑物顶面局部出现峰值负压的主要原因. 实验结果还显示, 在一定风向角下, 由于分离流动产生的锥形涡结构在屋顶局部可以诱导出时均负压峰值达 -1.0 以上; 在风向角 $\beta = 30^\circ$ 时, 锥形涡强度达到最大, 其诱导的顶面附近局部时均负压峰值可达 -2.4 , 瞬时风压达 -5.7 以上, 是导致建筑物屋顶在强风下损坏的根本原因.

关键词 锥形涡, 顶面风荷载, 风洞模拟, 压力分布

中图分类号: TM62 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2007)05-0655-06

引 言

建筑物的风荷载是结构设计的重要依据之一, 由于地面粗糙度的影响, 在湍流的作用下, 地面附近的风速随离地面高度增加而增加, 因此, 人们比较关注高层或高耸建筑和结构的风荷载, 并取得了许多研究成果. 然而, 近年来人们发现, 从整体来讲由于风灾引起的建筑物损坏而言, 低矮建筑遭受破坏是巨大的, 而低矮建筑物的破坏往往发生在其屋面, 因此, 进行了许多研究, 包括各种机理性研究、风洞模拟实验和现场实测等. 在现场实测中影响最大的是德克萨斯理工大学 (TTU, Texas Tech University)^[1,2] 进行的低矮建筑现场实测项目. 研究发现低矮建筑物屋面在风作用下的破坏与产生的锥形涡结构是密切相关的.

Kawai^[3] 最近指出屋面局部负压峰值的出现和在一定风向角下屋面形成巨大、强烈的锥形涡有关, 如图 1 所示, 并探讨了改变屋檐结构形状来减少负压峰值的方法. Marwood 和 Wood^[4] 还在低矮建筑物模型的屋顶区域进行了截面速度测量, 从截面速度场中清晰地获得了两个相向旋转的集中涡图像. 而 Banks 等^[5] 还使用烟线法直接观察到了屋顶的集中涡. 这些流动显示实验的结果都印证了 Kind^[6] 关于在一定风向角下流动为锥形分离涡结构的推断. 一

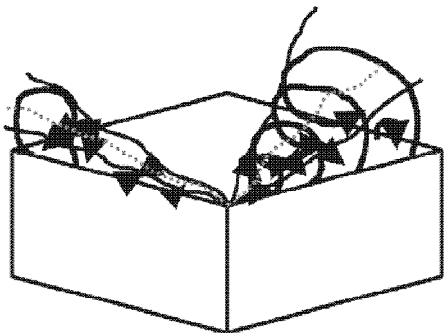
些研究者还专门研究了屋顶的时均负压峰值与锥形涡空间位置之间的对应关系. Kawai^[7] 进行了截面速度测量与屋顶截面压力测量的对照实验, 结果显示流场中集中涡的涡核位置与顶面等压线分布中的脊线位置相对应, 说明了顶面压力分布中出现的负压峰值位于锥形涡涡核下方. Kawai 的实验还发现锥形涡涡核与屋顶前缘的夹角基本保持不变, 在层流边界层中涡核与建筑物屋顶前缘的夹角为 13° , 在湍流边界层中涡核与屋顶前缘的夹角为 10° .

许多低矮建筑, 特别是居民住宅大多是双坡型屋顶, 因此对这种类型的建筑研究比较多. 然而, 许多大型公共建筑, 如大型仓库、工厂、飞机库等, 往往采用平面屋顶. 同样由于锥形涡的作用而发生破坏的例子也不少. 目前国内对于建筑物屋顶风致破坏及其机理的研究很少. 本文通过风洞模拟实验, 对一个立方体形状的建筑物顶面的风荷载特性进行了研究, 给出了顶面的脉动风压分布随风向角变化的规律和特性, 进而分析了顶面的分离流结构在不同风向角下的演化过程, 特别讨论了锥形涡诱导下建筑物顶面的时均和脉动风压分布和特性. 为今后更加深入开展有关锥形涡的形成、演化及其和物体表面压力分布的相互关系研究提供基础. 同时, 也可以为飞机库等大型平面屋顶结构的风荷载设计提供借鉴.

2006-08-17 收到第 1 稿, 2007-06-19 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (10172008).

2) E-mail: guzf@pku.edu.cn

图 1 强烈的锥形涡及其诱导的屋面高峰值负压^[3]Fig.1 Strong conical vortex to induce high peak suction^[3]

1 模型和实验设备

1.1 模型

本研究选择的模型是长、宽和高都是 $L = 120\text{ mm}$ 的立方体。模型由有机玻璃制作，并在顶面布置了 100 个测压孔。为了提高屋顶边角附近测压的空间分辨率，同时减少测压孔的总数量，测压孔的布置采用了非均布方式，其中角点 O 附近的区域和两条相邻边缘 $OF(x \text{ 方向})$ 和 $OR(y \text{ 方向})$ 附近的测压孔布置比较密集，这个区域将是测压研究的重点区域。测压孔内镶有内径为 0.93 mm 的紫铜管，管口与模型表面垂直平齐，另一端通过塑料管与压力扫描阀连接。实验风向角定义为风向正对模型一边时为 0° ，顺时针方向为正。顶面测压孔布置和实验风向角的定义如图 2 所示。

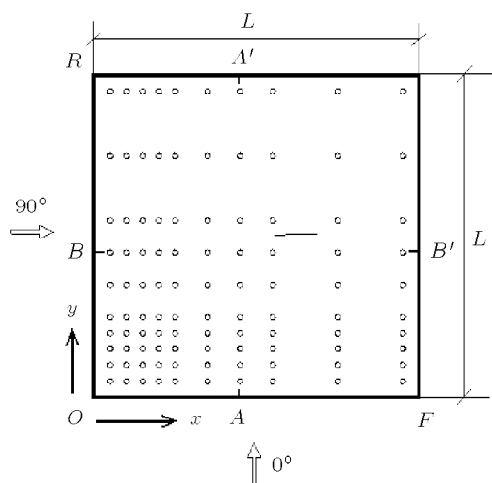


图 2 模型顶面测压孔布置及风向角定义

Fig.2 Pressure taps on the top of the model and the definition of wind direction

1.2 风洞及大气边界层模拟

实验是在北京大学力学与工程科学系 $\phi 2.25\text{ m}$ 大型低速风洞中进行的。该风洞原设计为回流式航空风洞，实验段为圆型开口，直径 2.25 m ，试验段长 3.65 m ，空风洞时试验段最大风速 50 m/s ，气流的本底湍流度大约为 0.2% 。为了进行建筑空气动力学方面的试验，该风洞试验段进行了适当的改装。在风洞试验段水平轴线以下 500 mm 处铺设了一块地板，从试验段出口处向来流方向延伸至风洞的平直段和收缩段内 3 m 处。从地板的迎风前沿沿流向布置了尖塔、挡板和粗糙元等，采用人工加速的方法来形成大气边界层风速剖面。

本次实验模拟的平均速度为幂次律 $\alpha = 0.22$ 的大气边界层气流（即《规范》中的 C 类地区）和相应湍流度分布的风速剖面。按照模拟的大气边界层厚度，模型相当于全尺寸边长为 40 m 的立方体形建筑。

1.3 风压测量技术和数据处理

模型表面风压测量用美国扫描阀公司 Scanvalve Corp 的 5 个单元组合机械扫描阀进行。在每个组合扫描阀单元中各安装一个压力传感器，型号为 PDCR23，量程为 0.5 PSI ，静态满量程精度为 $\pm 0.06\%$ ，固有频率大于 35 kHz 。为了在风洞实验中获得正确的瞬时风压数据就需要获得尽可能高的频率响应，在连接测压孔和扫描阀的每一根塑料管中接有限流器 (Restrictors)。经过实验前的标定，测压系统的频率响应在 100 Hz 以下时，幅值误差小于 3% ，相移可以忽略。

实验中在每一个测点采集 3900 个数据，采样频率为 400 Hz ，低通滤波器设为 100 Hz 。实验中采用名义风速为 15 m/s 。则按照相似准则折合成全尺寸时的时间分辨率为 1 s ，采样时间长度折合成全尺寸时约为 1 h 。以模型的边长为特征长度算得的实验雷诺数为 $Re = 1 \times 10^5$ ，满足了 Tieleman^[8] 指出的具有尖锐边缘的模型 Re 数不小于 5×10^4 的要求。

定义时间平均压力和压力脉动均方根值系数分别如下：

$$\text{时间平均压力系数: } C_{p_{\text{mean}}} = \frac{\bar{P} - P_0}{q}$$

$$\text{均方根值压力系数: } C_{p_{\text{RMS}}} = \frac{\sigma}{q}$$

其中 $\bar{P}$, σ , P_0 和 q 分别为模型上测得的时间平均压力、脉动压力的均方根值、来流静压和参考高度处的动压。在本研究中，来流的参考高度为模型顶面高度。

2 实验结果和分析

本文通过对建筑物模型顶面压力分布的分析, 研究了建筑物的平面屋顶上分离流动的特点, 包括流动结构及其诱导风压随风向角的演化, 以及模型高度增加对诱导风压的影响. 其中时均压力 $C_{p\text{mean}}$ 的分布能够反映分离流动结构的特征, 而脉动风压的均方根值 $C_{p\text{RMS}}$ 的分布则能够反映结构的宏观脉动特征.

为了便于在后续分析中通过压力分布特征理解分离涡的变化, 首先对旋涡与其诱导压力特征之间的对应关系作定性分析.

2.1 分离涡结构及其诱导时均风压随风向角的变化特性

图 3 给出了风向角从 0° 到 45° , 模型顶面的时均等压线分布随风向角的变化趋势, 图中箭头代表风向. 从图中可以看到, 风向角为 $\beta = 0^\circ$ 时的等压线平行于迎风前缘 OF , 呈现出一定的二维特征. 此时, 来流垂直于迎风前缘 OF , 气流受到前壁的阻挡, 而部分气流绕过屋顶前缘发生分离并在顶面稍后部分再附, 在屋顶前缘和分离再附点之间形成了分离泡结构. 为了对顶面流动结构的细节有更加细致的了解, 在顶面上分别垂直于边 OF 和 OR 取了两个截面 $A-A'$ 和 $B-B'$, 截面 $A-A'$ 和截面 $B-B'$ 分别与各自平行的边 OR 和 OF 距离 $0.45L$. 在两个截面上的时均压力分布如图 4 所示. 从截面 $A-A'$ 上的压力分布曲线中可以看到, 分离泡在顶面诱导出最大 -0.7 左右的时均负压 ($y/L = 0.2, \beta = 0^\circ$), 并且在再附区域 ($y/L = 0.75$) 附近恢复到 0 附近. 该结果和 Richards 等^[9] 专门对一个 6m 立方体顶面的流动再附问题的实验研究结果完全吻合.

随着风向角增大, 气流与前缘 OF 不再垂直. 当风向角 $\beta = 10^\circ$ 时, 从图 4 的 $A-A'$ 截面压力分布曲线中可以看到, 在前缘附近的分离剪切层造成的负压值接近 0.9 , 比风向角 $\beta = 0^\circ$ 时有所增加. $\beta = 10^\circ$ 的压力曲线与 $\beta = 0^\circ$ 的压力分布相比, 峰值略微增大, 而曲线形状几乎没有变化, 说明了沿前缘的分速度造成的三维效应使得分离剪切层的强度有所增强, 正如图 3 所示, 等压线分布只在屋顶迎风顶点附近出现了等压线倾斜和局部压力梯度增大.

当风向角 β 增大到 20° 时, 绕前缘 OF 分离的气流的轴向速度随着风向角的增大而增大, 分离剪切层卷绕的三维特征也进一步增强. 从图 3 中可以

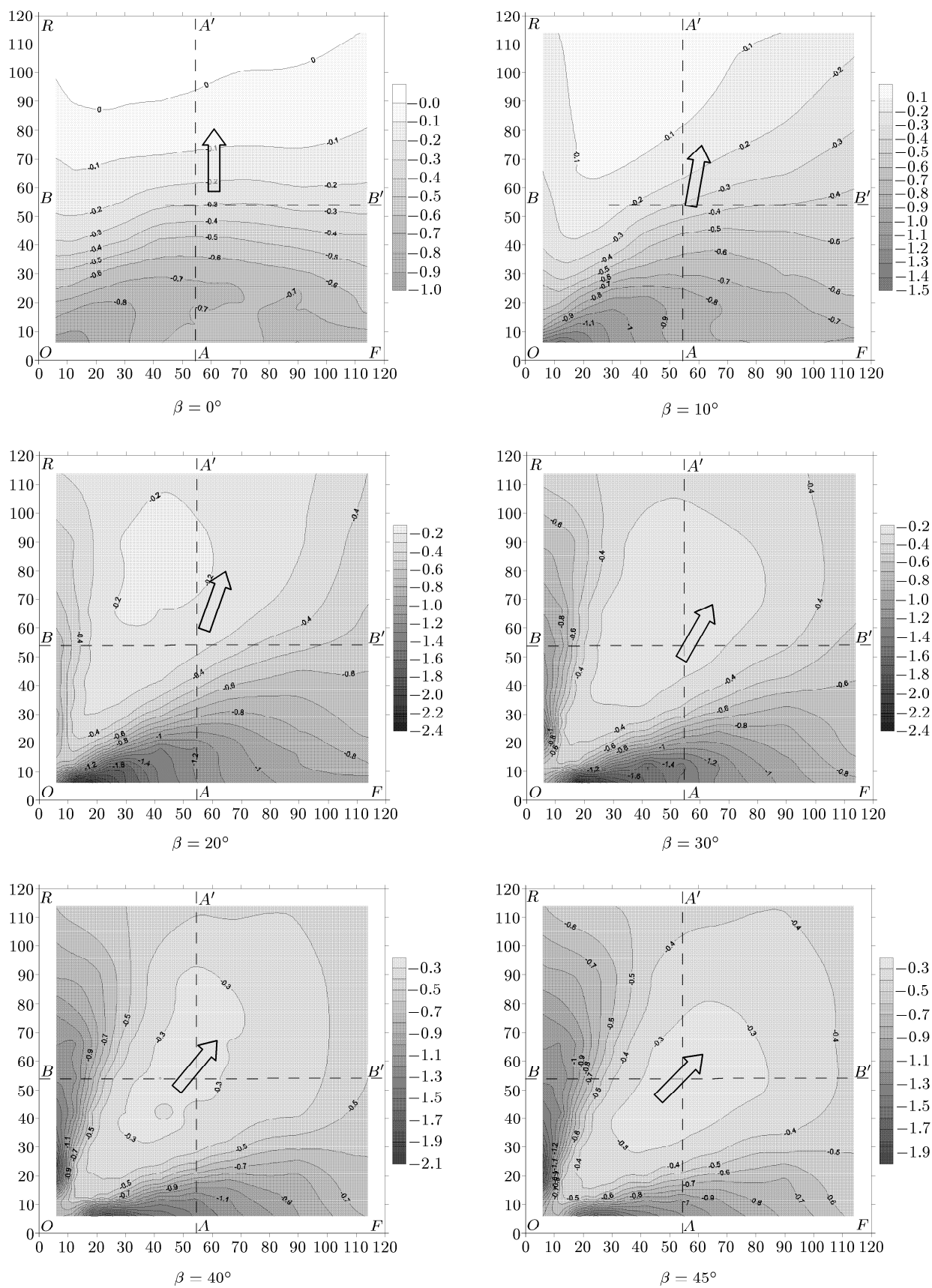
看到迎风前缘 OF 下游出现明显的三角形负压区, 这种等压线分布特征与三角翼上表面锥形涡诱导的压力分布相同, 说明在前缘 OF 形成了单侧锥形涡结构. $\beta = 20^\circ$ 时 $A-A'$ 截面压力分布曲线的负压峰值与风向角 $\beta = 0^\circ$ 和 10° 相比明显提高. 同时 $A-A'$ 截面负压最大值达到 -1.0 以上, 高负压区域范围缩小, 这是锥形涡诱导的表面压力分布特征之一.

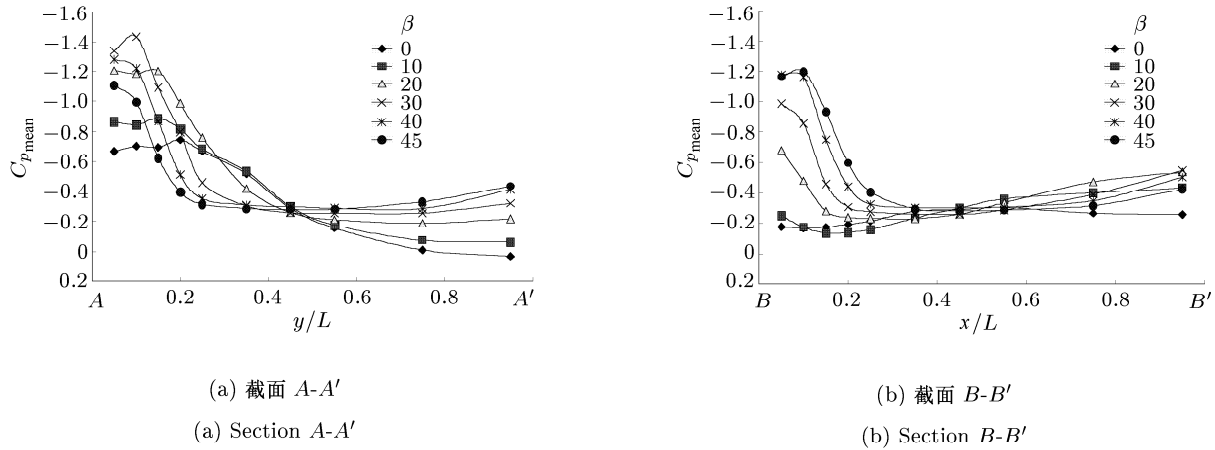
同时注意到, 随着风向角的增加, 原本平行于来流的另一边 OR 也逐渐迎风. 在 $\beta = 20^\circ$ 时, 从图 3 中已经能够看到具有气流分离特征的近似平行于边 OR 的等压线分布, 但垂直于前缘 OR 的气流卷绕速度太小, 还不具备锥形涡形成的条件, 在图 4 中给出的 $B-B'$ 截面的压力分布曲线只在非常靠近前缘 OR 的位置达到 -0.7 左右的负压.

当风向角增加到 30° 时, 沿前缘 OF 的流向速度继续增大, 锥形涡由于轴向速度的增加受到更大的拉伸, 三维特征更加明显, 涡强继续增强, 使得图 4 中的 $A-A'$ 截面压力分布曲线上负压峰值继续增大. 同时, 高负压区域范围继续减小以及峰值位置的平移意味着涡核高度继续下降, 并随风向角继续向边 OF 移动. 此时, 前缘 OR 上分离的剪切层的卷吸强度已足以形成另一个锥形涡结构. 从图 4 中 $B-B'$ 的截面压力分布中可以看到负压峰值已达到 -1 , 并且高负压区域逐渐增大.

当风向角继续增大到 40° 时, $A-A'$ 截面曲线峰值继续左移, 高负压区域继续减小, 但截面曲线峰值的变化规律发生了转折, 由随风向角 β 增大而增大变为随风向角 β 增大而减小, 反映出锥形涡的强度在 $\beta = 30^\circ$ 左右达到极大值, 诱导的顶面最大负压时均值在 -2.4 左右 (见图 3). 原因是来流在随风向角增大的过程中, 在前缘 OF 上会产生平行于前缘和垂直于前缘的两个分速度, 其中平行于前缘的分速度持续增加, 可能会对旋涡的强度起增强作用, 或许还与 (准) 二维分离与三维分离的综合影响作用有关; 同时垂直于前缘的分速度持续减小, 对旋涡的强度起到削弱作用. 在两个作用相反的机制的此消彼涨过程中, 前缘 OF 上的锥形涡经历了从形成到增强再到减弱的过程, 在风向角 $\beta = 30^\circ$ 时, 对前缘 OF 上形成的锥形涡是两种机制综合效益最高的状态.

当风向角 $\beta = 40^\circ$ 时, 另一个截面 $B-B'$ 上负压峰值继续增大, 峰值位置继续向右移动, 高负压区域继续增加. 这一特点反映了前缘 OR 产生的锥形涡强度在继续增强的过程中, 涡核高度在持续抬升,

图 3 模型顶面时均压力 $C_{p_{\text{mean}}}$ 等压线分布随风向角 β 的变化Fig.3 Contour of $C_{p_{\text{mean}}}$ on the top of model versus with wind directions β

图 4 模型顶面截面 C_{pmean} 随风向角 β 的变化Fig.4 Distribution of C_{pmean} on the top of model section versus with wind directions β

同时涡核的横向位置在逐渐远离前缘 OR 而偏向来流的中心。实际上,从图 3 的等压线分布中能够更加明显地看到前缘 OF 和 OR 各自形成的锥形涡随风向角变化在顶面横向移动的趋势。

随着风向角继续增大到 $\beta = 45^\circ$, 根据对称原理, 屋顶的流动趋向于关于对角线对称, 从图 3 中可以清楚地看到 $\beta = 45^\circ$ 时等压线的对称分布。从图 4 的截面压力分布曲线中则可以看到, 与 $\beta = 40^\circ$ 时相比, 截面 $A-A'$ 上的压力峰值继续减小, 峰值位置继续靠近前缘角点的位置, 说明涡核在继续向前缘移动, 同时涡强减小; 高负压区域范围继续缩小也意味着涡核高度的继续下降。同时, 截面 $B-B'$ 上的压力峰值也仍然在增大, 只是增加幅值较小, 同时峰值位置与 $\beta = 40^\circ$ 相比也继续右移。值得注意的是, 截面 $A-A'$ 和 $B-B'$ 上的压力分布曲线在 $\beta = 45^\circ$ 的时候峰值基本都在 -1.2 左右, 符合对称性原理, 但是从曲线峰值的横向位置看, 两者存在较明显的差异, 对称性比较差, 这应该是系统实验误差, 包括模型制作误差造成的。

2.2 顶面脉动压力的均方根值分布

为了获得锥形涡结构作用在顶面脉动压力动态特性, 在实验数据分析中, 对获得的脉动压力信号, 特别是出现比较强烈锥形涡的顶面尖角附近的测压点进行了脉动压力功率谱分析。分析结果表明, 在功率谱中没有明显突出的峰值出现; 对照在二维圆柱绕流亚临界雷诺数脉动压力功率谱分析中, 特别是在分离点附近, 出现了非常明显的峰值, 其 Strouhal 数等于 $0.2^{[10]}$ 。为此, 可以认为二维圆柱旋涡脱落引起的分离点附近表面压力的周期性脉动是非常强烈

的; 而屋面卷起的锥形涡结构由于是一种旋涡的旋转和演化过程, 而不是旋涡的脱落过程, 所以, 在屋面诱导的脉动压力信号中没有强烈的周期性的变化, 因此在功率谱分析中没有明显的峰值, 只反映在脉动压力的均方根值非常大。因此, 屋面产生的锥形涡特性也不适合用 Strouhal 数描述。

模型顶面脉动压力的均方根压力系数 C_{pRMS} 的等压线分布随风向角的变化规律与图 3 的时均压力 C_{pmean} 分布极其相似 (由于篇幅关系, 在此不详细给出), 即均方根等压线分布也具有锥形涡诱导压力分布的特征, 在顶面的某一中心区域压力脉动量最大, 远离这一中心区域, 脉动量减小。同样, 均方根压力分布和时均压力分布随风向角的变化规律也是基本一致的。说明顶面风压的脉动除了与来流湍流度有关外, 主要来源于分离造成的具体流动结构。在锥形涡诱导下, 局部风压脉动均方根 C_{pRMS} 系数可达 1.1 以上。根据正态分布, 顶面局部的瞬时风压系数可达 -5.7 以上。

3 结 论

通过风洞模拟实验, 获得了在不同风向角下立方体形建筑物顶面的时均压力分布和脉动压力均方根分布的系统结果结论如下:

(1) 当风向角 $\beta = 0^\circ$ 时, 气流在前缘分离并产生的分离泡是建筑物顶面前沿局部产生比较大负压的主要原因, 产生的负压值在 -0.7 左右。当风向角增加时, 由于三维效应的增加, 前沿局部的负压峰值也会增加。

(2) 当风向角 $\beta = 20^\circ$ 时, 迎风前缘会出现锥形涡结构, 从而导致局部时均负压峰值达 -1.0 以上。

(3) 当风向角 $\beta = 30^\circ$ 时, 迎风前缘形成的锥形涡的强度达到最大, 其诱导的局部负压峰值可达 -2.4 以上. 同时, 另外一侧的前缘附近也形成了第 2 个锥形涡结构.

(4) 当风向角进一步增加并达到 $\beta = 45^\circ$ 时, 两个锥形涡经历了一个此消彼涨的过程, 此过程充分反映在它们各自诱导的局部负压峰值的大小变化和高负压区域范围的大小变化.

(5) 风压脉动均方根值分布与时均风压分布十分相似.

(6) 锥形涡结构诱导的负压峰值位置位于建筑物顶面矩形平屋顶迎风角点附近前沿的内侧. 这是建筑物顶面在强风下造成局部破坏的根本原因.

参 考 文 献

- 1 Tieleman HW. Model/Full scale comparison of pressures on the roof of the TTU experimental building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996, 65: 133~142
- 2 Sarkar PP, Zhao ZS. Flow visualization and measurement on the roof of the Texas Tech building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 69-71: 597~606

- 3 Kawai H. Local peak pressure and conical vortex on building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90: 251~263
- 4 Marwood R, Wood CJ. Conical vortex movement and its effect on roof pressure. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 69-71: 589~595
- 5 Banks D, Meroney RN, Sarkar PP, et al. Flow visualization of conical vortices on flat roofs with simultaneous surface pressure measurement. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 84: 65~85
- 6 Kind RJ, Worst suction near edges of flat rooftops on low-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1986, 25: 31~47
- 7 Kawai H, Structure of conical vortices related with suction fluctuation on a flat roof in oblique smooth and turbulent flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 69-71: 579~588
- 8 Tieleman H W, Wind tunnel simulation of wind loading on low-rise structures: a review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91: 1627~1649
- 9 Richards PJ, Hoxey RP. Flow reattachment on the roof of a 6m cube. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94: 77~99
- 10 Sun TF, Gu ZF, He DX, et al. Fluctuating pressure on two circular cylinders at high Reynolds number. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 41-44: 577~588

CONICAL VORTEX INDUCED WIND LOADING ON THE ROOF OF A BUILDING¹⁾

Chen Xuerei Gu Zhifu²⁾ Li Yan

(Engineering College, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract By means of wind tunnel simulation the wind loading on the roof of building induced by conical vortex is investigated. The pressure distributions on the roof of the model are obtained and the mechanism of the flow is analyzed. The structure of separated flow from the roof of building is shown to vary with wind directions and its developing process is also analyzed. It is indicated that appearance of conical vortex is the main reason of occurrence of the peak suction on the roof. Results show that under certain wind directions the local time mean pressure coefficients are greater than -1.0 . Moreover, the intensity of conical vortex reaches the maximum value at the wind direction $\beta = 30^\circ$ and the time-mean peak suction and fluctuating coefficients may reach -2.4 and -5.7 , respectively. It is usually the main cause of damage for the roof of buildings during strong winds.

Key words conical vortex, wind loading on roof, wind tunnel simulation, pressure distribution

Received 17 August 2006, revised 19 June 2007.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10172008).

2) E-mail: guzf@pku.edu.cn