

青岛体育中心膜顶结构方案风荷载风洞实验

顾志福 李燕

赵秀福

钟莉莉

(北京大学力学与工程科学系 北京 100871)(北京市建筑设计研究院)(北京市光翌空间膜技术工程有限公司)

摘 要 通过风洞实验研究了青岛体育中心膜顶结构方案的风荷载特性。实验是在模拟了B类地区的速度剖面下进行的,探讨了该膜顶结构的风荷载(包括时间平均风压,瞬时最大风压,瞬时最小风压和风压脉动均方根值)随来流风向角的变化规律。为类似的膜顶结构风荷载计算提供了有用的数据。

关键词 风洞 实验 膜结构 风荷载

中图分类号 TU834.3⁺³

建筑物的风荷载是结构设计的重要依据之一。大型现代化体育建筑在风作用下整体被破坏的例子几乎没有,但局部表面饰物被风吹脱落或屋面局部被掀开而造成整个屋面遭受破坏的情况国内外却时有发生,这种情况往往是由于风的作用在建筑物局部表面产生意想不到的负压峰值有关。空气动力学中一般使用无量纲的压力(强)系数,特别是其中的时间平均压力系数(C_p),来表示物体表面所受的压力荷载。在来流等其他条件相同的情况下,上述无量纲压力系数明显地随着物体的形状的变化而发生变化。如果将建筑物某一特征面积范围内的平均压力系数进行加权平均,就可以得到建筑荷载规范中所谓的风载“体型系数”,一般使用符号 μ_s 来表示。

北京大学力学与工程科学系空气动力学实验室受委托对青岛体育中心膜顶结构方案B进行风荷载实验研究。实验的目的是确定该方案的膜顶结构形状的风载体型系数,为做进一步的结构计算提供科学依据。

青岛体育中心位于青岛市东北郊约30km处。该体育中心平面布置呈椭圆形,南北向长轴为266m,东西向短轴为196m。体育中心外围一圈标高相同,均为26m。青岛体育中心体育场在主体结构施工后罩篷的形式发生较大变化,此次风洞实验是针对建在四周看台顶由3m高钢骨架支撑的整个膜顶结构。由于该膜顶结构的独特形状,如何确定风荷系数是罩篷计算和强度设计的关键。由于膜顶结构是后加的,所以,正确预测膜顶结构的风荷载对于总体结构的安全也十分重要。

通过风洞实验确定膜结构风荷载主要有两种方法:一是制作膜结构结构的气动弹性模型,然后利用天平来测量该结构的总体受力情况,即阻力、升力和倾覆力矩等;另一种方法是将膜结构做成刚性模型,在模型表面布置测压孔,通过测量压力分布来确定风荷载或体型系数,要获得结构总体受力情况再通过对压力分布进行积分的方法来获得。后者的缺点是无法模拟膜结构在风荷载作用

下产生的变形对风荷载的影响。本实验采用的是测量膜顶表面压力分布的方法。

1 实验设备、模型、测量仪器和实验方案

1.1 实验设备

实验是在北京大学力学与工程科学系大型低速风洞中进行的。该风洞为回流型大型低速风洞,实验段圆形开口,直径 2.25m,实验段长 3.65m,空风洞时实验风速可达 60m/s,本底湍流度约为 0.2%。为了进行结构物风荷载试验,对风洞进行了适当的改造。在风洞实验段轴线以下 500mm 处放置了一块横跨整个实验段的地板,并从实验段出口处向来流方向一直延伸至风洞的平直段和收缩段内 3m 处。然后,在地板的迎风面的前沿部分布置了尖塔和粗糙元等,采用人工加速的方法来形成大气边界层气流的风速剖面。经改装后用于建筑物风荷载试验的风洞实验段布置如图 1 所示。

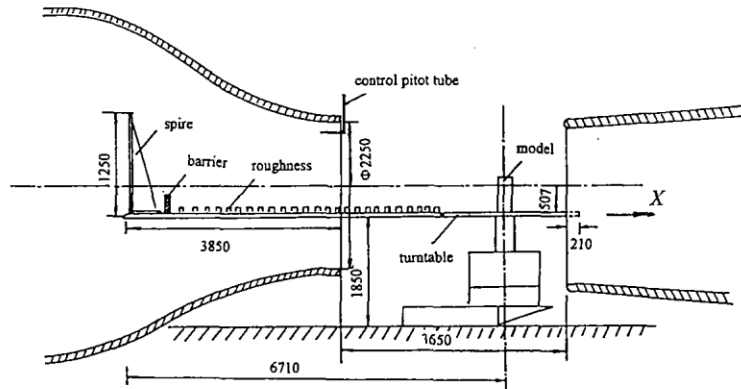


图 1 经改装后用于建筑物风荷载试验的北京大学 $\Phi = 2.25\text{m}$ 低速风洞实验段布置示意图

在试验段后部靠近风洞扩散段入口处装有直径 2m 的转盘。试验模型安装在转盘中心。在实验中通过转动模型来实现相对模型的任意风向角。用美国 TSI 热线热膜风速计对转盘中心附近,即实验模型区的速度剖面进行了测量。通过调整尖塔和粗糙元等的各种几何参数,在模型实验区获得了根据国家规范(《建筑结构荷载规范》GBJ9-87)中所要求的对应于中等城市郊区 $\alpha = 0.16$ 幂次率的平均速度分布和相应湍流度分布。同时,也对流场的横向均匀性进行的校核。在国外对航空风洞进行类似的改造来进行建筑物风荷载实验的例子见文献[1]。

1.2 模 型

按照 1:250 的缩尺比用 ABS 和有机玻璃等强度较好的高分子材料制作了青岛体育中心主体及膜顶结构的刚性测压模型。为了布置尽可能多的测压点,利用体育中心的对称性,仅在对应的 2 个 1/4 膜顶的上、下面布置了测压点,在布置了测压孔的 1/4 膜顶上、下面各有 6 排测压孔,每排 18 个测压孔。从膜顶整体结构来看它是由 70 个长度相同,尺寸相似的单元体连接组成。这样在每个单元体模型的顶部自青岛体育中心外侧向内侧的 6 个测压孔顺序编号是 A, B, C, D, E 和 F。在测压部分的膜顶表面每个测压孔镶有内径为 0.93mm 的紫铜管,测压孔与模型表面垂直平齐,再通过塑料管与压力扫描阀连接。为了获得尽可能高的频率响应,在每一根塑料管中间接有限流器(Registor),根据实验前的标定,该测压系统的频率响应在 150HZ 以下时幅值误差小于 2%,相移可忽略。

1.3 测量仪器

压力测量和数据采集分别由美国扫描阀公司 Scanvalve Corp 的机械扫描阀和计算机完成. 在每一个测点采集了 2048 个数据, 采样频率为 500HZ, 通过计算给出了每一测点的峰值负压 (Min), 峰值正压 (Max), 平均压力 (Mean) 和压力脉动均方根值 (RMS). 为了核对数据的重复性和可靠性, 还采用了美国惠普公司 HP3054A 自动数据采集控制系统进行了重复实验, 结果表明重复性相当满意. 两者数据差别完全在实验允许的误差范围之内.

1.4 实验方案

按要求本次实验没有考虑模拟体育中心周围建筑或地形的影响. 根据模型的对称性, 只要给出 $0 \sim 90^\circ$ 范围内模型的压力分布就可以得到全方位所有风向角时的结果. 一方面根据国家规范可以查出青岛地区的基本风压, 它适合于所有的风向角. 另一方面, 我国各地的气象资料通常给出 16 个方位角下 10 分钟平均年最大风速, 结合建筑物不同风向角时的不同风载体型系数, 可以给出更为合理的风荷载结果. 因此, 为了更科学合理地利用当地的气象资料和风洞实验结果, 在实验中进行了风向角 β 为 $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ 和 90° 时 5 个风向角整个膜顶结构的风压分布测量. 由于测压孔仅布置在相应的两个 $1/4$ 膜顶的上、下面上, 因此, 需要通过 16 个风向角的实验, 即 $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ, 135^\circ, 157.5^\circ, 180^\circ, 202.5^\circ, 225^\circ, 247.5^\circ, 270^\circ, 292.5^\circ, 315^\circ, 337.5^\circ$ 才能获得上述 5 个风向角下整个膜顶的风荷载.

2 数据处理和实验结果讨论

2.1 数据处理

实验所测得的膜顶、下表面的压力以时间平均、瞬时最大、瞬时最小和均方根值压力系数的形式给出, 分别定义如下:

$$\begin{aligned} \text{时间平均压力系数: } C_p &= \frac{\bar{P} - P_0}{q}; & \text{瞬时最大压力系数: } C_{\hat{p}} &= \frac{\hat{P} - P_0}{q}; \\ \text{瞬时最小压力系数: } C_{\hat{p}'} &= \frac{\hat{P}' - P_0}{q}; & \text{均方根值压力系数: } C_{p'} &= \frac{\sigma}{q} \end{aligned}$$

其中 $\bar{P}, \hat{P}, \hat{P}', \sigma, p_0$ 和 q 分别为模型上测得的时间平均压力, 瞬时最大压力, 瞬时最小压力, 脉动压力的均方根值, 来流静压和参考高度处的动压.

正压定义为由于风作用在建筑物表面产生的向内推力, 而负压或吸力定义为作用在建筑物表面产生的向外拉的力.

上述平均压力系数在相应面积上的平均或积分即给出了通常规范中的体型系数.

为了清楚起见, 绘制了上述 4 个压力系数及所对应的风向角和膜顶、下面等压线图. 至于瞬时最大和最小压力系数在顶面和底面不是在同一瞬时测得的, 在某一测点风压随时间的变化是一个随机的过程, 所以不能作简单的叠加处理.

2.2 实验结果

具体结果由详细的实验数据表给出. 在这里仅对膜顶顶面的平均压力系数结果进行分析和讨论. 作为例子, 图 2 给出了风向角分别为 $\beta = 0^\circ, \beta = 22.5^\circ, \beta = 45^\circ$ 和 $\beta = 90^\circ$ 时膜顶上表面的平均压力等压线图. 在风向角 $\beta = 0^\circ$ 时, 膜顶的迎风部分, 即几乎整个圆弧部分的风压系数相对较大 (指负压绝对值, 下同), 在迎风外缘 (A51, 55) 和内缘第二排 (F52, 54) 最大值 $C_{p_{\text{mean}}}$ 分别达 -0.832 和 -0.843 , 而中间部分 (C, D) 均在 $-0.2 \sim -0.3$ 左右. 内缘的第一排由于这里的膜有个向下的角度, 因而压力系数下降到 -0.4 左右. 除了膜顶迎风面的一小部分范围, 其他部分的压力系数均在

-0.3 至 -0.2 之间变化,相对来说是比较均匀的.

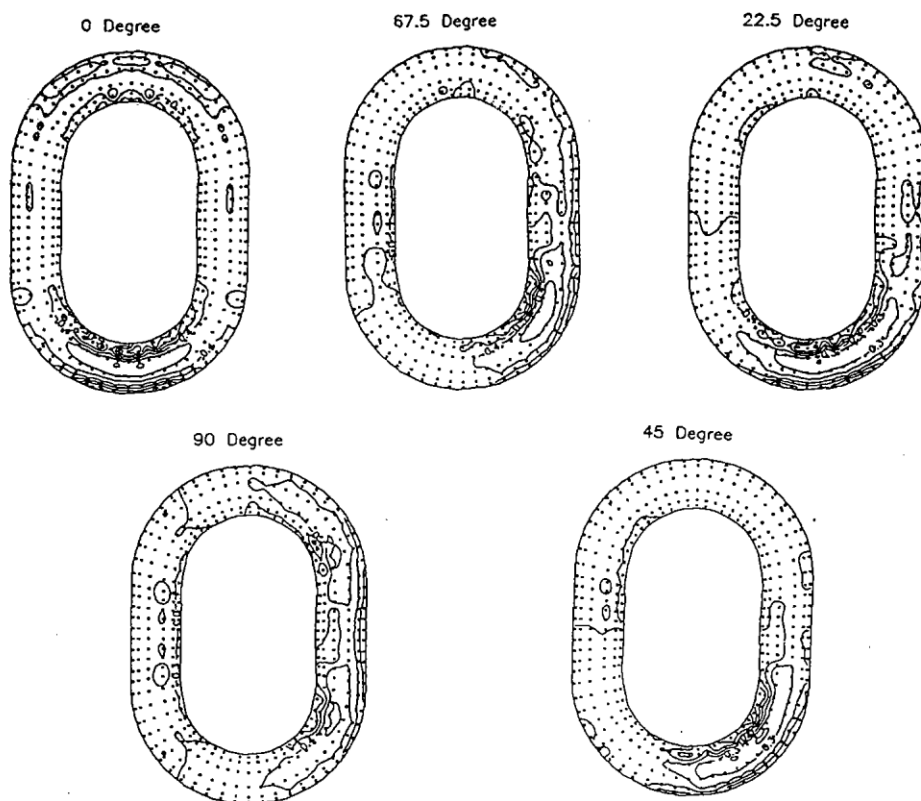


图 2 风向角分别为 $\beta = 0^\circ, \beta = 22.5^\circ, \beta = 45^\circ, \beta = 67.5^\circ$ 和 $\beta = 90^\circ$ 时膜顶上表面的平均压力等压线图

在风向角为 22.5° 时,顶棚顶面的平均压力系数分布形态与 0° 时相似,只是风压系数相对较大部分的位置随风向角偏转而偏转. 另一方面,从数值上来讲也稍有增加,在 A56 测点达 -0.858,相应的内缘第二排测点(E56)为 -0.788. 其余部分的风压与 0° 时数值相当或稍大.

当风向角进一步增加到 45° 时迎风外缘(A)的风压反而有所下降,最大值在 A57 为 -0.668,而内缘第二排测点的最大值(E61)为 -0.805.

在风向角增加到 67.5° 时,迎风外缘最大值为 -0.711(A65),而内缘第二排最大值(E61)为 -0.796.

在 $\beta = 90^\circ$ 时,这时,风向正对体育中心的长轴,迎风部分外缘(A)最大值为 -0.694(A1,70),内缘第二排最大值为 -0.669 对应的测点是 E10 和 E61.

膜顶顶面各测点平均压力系数的特点和随风向角的变化可归结为以下几点:

(1) 迎风面部分的压力系数较大,峰值出现在外缘(A)和内缘第二排(E),最大值可达 -0.8 以上.

(2) 除迎风面外的其余部分,风压分布比较均匀大致在 -0.3 至 -0.4 左右变化.

(3) 随风向角变化,膜顶顶面分布的基本形态基本不变,出现较大压力系数的区域随风向角偏移而偏移,数值上虽有变化但不是很大,在 10% 以内. 对于膜顶底面的平均压力系数相对顶面而言更加均匀. 迎风的部分在 -0.3 至 -0.4 之间变化,而以内缘部分面对风向的顶棚底面的平均压力系数更小在 -0.2 以下,其余部分均在 -0.2 至 -0.3 之间变化.

类似的,膜顶顶面和底面瞬时最小,瞬时最大压力系数也显示了上述膜顶顶面平均压力分布及

随风向角变化的特点,膜顶顶面瞬时最小压力系数 C_{pmin} 可达 -1.4 以上. 压力脉动的均方根值分布变化趋势与平均值和瞬时最小,瞬时最大的变化完全一致,出现峰值较大的位置(迎风部分膜顶)均方根值也很大是其余测点的二倍或更大.

3 结 论

通过风洞试验研究结果还表明,该膜顶方案从风荷角度来讲是比较有利的. 这是由于膜顶结构外缘与主体结构用3m高的立柱支撑气流可以自由通过,另外膜顶结构的纵向仰角仅为 5° 且膜顶内,外缘均分别处于同一标高.

该膜顶的风荷载主要特点是:

- (1) 与类似的建筑结构(体育场罩棚)相比较,其风压系数(或风载体型系数)较小.
- (2) 在不同风向角时其底面压力均为负压,且较为均匀. 与顶面在风作用下产生的较大负压起了一个抵销作用.
- (3) 该膜顶结构除迎风部分,特别是顶面,风荷载较大,变化也较大外,其余部分基本上是均匀的.

致谢:参加本实验工作的还有北京大学力学与工程科学系空气动力学实验室的赵广和、陈明福、刘翰林、王亚利和李红等,作者在此表示感谢.

参 考 文 献

- 1 RUSCHEWYH H. Dynamic response of high rise building under wind action with interference effects from surrounding buildings of similar size. Proceeding of the Fifth International Conference, Fort Collins, Colorado, USA, 1979

Wind tunnel study on wind loads of a membrane structure roof of a stadium

Gu Zhifu Li Yan Zhao Xiufu Zhong Lili

(Peking University, Beijing Institute of Architectural Design & Research, Peking 100871)

Abstract The features of wind loading were studied by means of wind tunnel test. The experiments were carried out in a simulated atmosphere boundary layer of a modified aeronautical wind tunnel. The characteristics of wind loading, including the time-mean pressure and the fluctuating pressure, on the membrane structure roof vary with the incident angle of flow are given.

Key words wind tunnel test wind loading membrane structure