

文章编号:1673-2049(2006)04-0074-05

上海北外滩酒店中庭结构风洞试验

沈之容¹, 王之宏²

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 安诚工程顾问有限公司, 上海 200020)

摘要:利用风洞试验对上海北外滩酒店中庭大跨度屋盖的1:200比例模型在各种风向角下的风压分布情况进行了测试,研究了中庭结构在不同方向风荷载作用下风压的变化情况。用统计方法对试验结果进行了分析,并与按规范方法计算的结果进行了比较。结果表明,对于结构正风压,除了立面下侧小部分外,按统计方法得到的计算值比按规范计算的值大,应作为设计荷载;对于结构负风压,按规范计算的值比按统计方法得到的计算值大,应作为设计荷载。该研究可为精确计算风荷载提供依据,对工程设计有较好的参考价值。

关键词:大跨度结构;围护结构;风洞试验;体型系数;风压系数

中图分类号:TU312.1 **文献标志码:**A

Wind Tunnel Test on Atrium Structure in Shanghai North Bund Hotel

SHEN Zhi-rong¹, WANG Zhi-hong²

(1. Department of Architectural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Hyder Consulting Ltd, Shanghai 200020, China)

Abstract: The behavior of wind pressure distribution on the atrium with long-span roof of Shanghai North Bund Hotel under different wind directions angle was investigated through a 1:200 model wind tunnel test. The variation situations of wind pressure on atrium structure were measured and studied under different directions wind load. The testing results were analyzed based on statistical method and compared with those based on the code method. The result indicates that most testing values are larger than the calculated values for positive wind pressure of atrium, but smaller for negative wind pressure. The larger values should be used as the design load. Therefore, it is vital to determine wind load precisely for engineering design of such important structures through comparing analysis.

Key words: long-span structure; cladding; wind tunnel test; building shape coefficient; wind pressure coefficient

0 引言

上海北外滩酒店位于上海市虹口区黄浦江畔,苏州河与黄浦江两河的交汇处。该建筑采用双子塔形式,由两幢高125 m的主楼与相连的裙楼组成。主体结构采用框架剪力墙结构。采光中庭位于两主楼

中间,高18.8 m,由于周围高层建筑较多,同时东面又临黄浦江,中庭大跨度屋盖除受到水平方向风压的作用,与地面有夹角的竖向风压也将对其产生一定的影响,鉴于中国目前的《建筑结构荷载规范》^[1](GB 50009-2001,以下简称规范)中没有给出这类结构相应的体型系数,为了更加精确地计算风荷载,需

要通过结构模型风洞试验确定中庭表面风压分布的情况。

1 风洞设备及测量系统

上海北外滩酒店(图 1)底部中庭结构(以下简称中庭结构)模型风洞试验是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的。该风洞为闭口回流式矩形截面风洞,整个回流系统呈水平布置。风洞由 1 台最大功率为 530 kW 的直流电机驱动,风速的调节和控制采用计算机终端集中控制的可控硅直流调速系统。试验段尺寸为宽 3 m、高 2.5 m、长 15 m。试验风速范围为 $0.5\sim68\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。风洞配有自动调速、控制及数据采集系统,浮框式六分量汽车模型应变式测力天平及转盘系统,建筑结构模型试验自动转盘系统。转盘的直径为 3.0 m,其转轴中心与试验段进口的距离为 10.5 m。流场性能良好,试验区流场的速度不均匀性小于 1%,湍流度小于 0.46%,平均气流偏角小于 0.5° 。

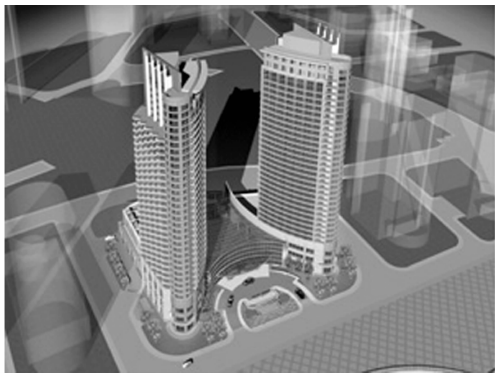


图 1 上海北外滩酒店建筑效果

Fig. 1 Building Perspective of Shanghai North Bund Hotel

在风洞试验中使用了两套测量系统。

(1) 风速测量系统

风洞试验流场的参考风速是用皮托管和微压计来测量和监控的。大气边界层模拟风场的调试和测定是用丹麦 DANTEC 公司的 Streamline 热线/热膜风速仪、A/D 板、PC 机和专用软件组成的系统来测量。热膜探头事先已在空风洞中明确标定。风速测量系统可以用来测量风洞流场的平均风速、风速剖面、湍流度及脉动风功率谱等数据。

(2) 风压测量、记录及数据处理系统

由美国 Scanivalve 扫描阀公司的量程分别为 $\pm 2\,540$ 、 $\pm 5\,080\text{ Pa}$ 的 DSM 3000 电子式压力扫描阀系统、PC 机、自编的信号采集及数据处理软件组

成风压测量、记录及数据处理系统。

2 试验概况

2.1 试验模型和测点布置

上海北外滩酒店风洞测压试验模型为刚体模型(图 2),用有机玻璃板和 ABS 板制成,具有足够的强度和刚度,在试验风速下不发生变形,并且不出现明显的振动现象,以保证压力测量的精度。考虑到实际建筑物和风场模拟情况,选择模型的几何缩尺比为 $1:200$ 。模型与实物在外形上保持几何相似。试验时将模型放置在转盘中心,通过旋转转盘模拟不同风向。

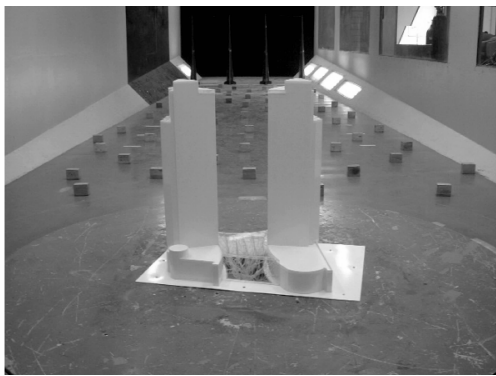


图 2 上海北外滩酒店试验模型(风洞中)

Fig. 2 Test Model of Shanghai North Bund Hotel (in Wind Tunnel)

在上海北外滩酒店中庭模型上总共布置了 92 个测点。在中庭顶部屋面上共布置了 47 个测点。在中庭的墙面上共布置了 45 个测点。各测点的详细布置见图 3,试验前经仔细检查,上述测压孔全部有效。

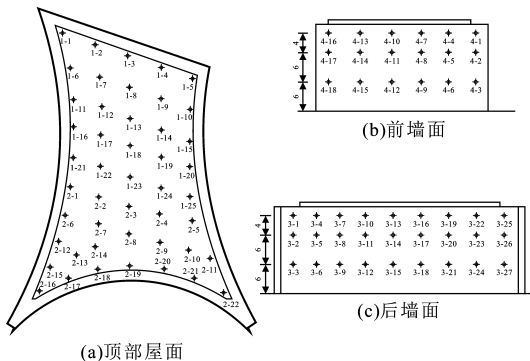


图 3 上海北外滩酒店风洞试验测点布置(单位:m)

Fig. 3 Arrangement of Measuring Points of Wind Tunnel Test on Shanghai North Bund Hotel(Unit:m)

2.2 大气边界层风场的模拟

根据上海北外滩酒店周围数公里范围内的建筑

环境,按规范确定本试验的大气边界层流场模拟为 C 类地貌风场。按照文献[2]的方法,以 1:200 的几何缩尺比模拟了 C 类风场。

2.3 试验工况

定义来流风沿中庭屋面中轴线吹向本工程时风向角为 0°,按顺时针方向增加。上海北外滩酒店方位及风向角定义如图 4 所示。试验风向角间隔取为 15°,即试验中模拟了 24 个风向的作用。

2.4 试验风速、采样频率和样本长度

风洞测压试验的参考点风速为 12 m·s⁻¹。测压信号采样频率约为 300 Hz,每个测点采样样本总长度为 6 000 个数据。另外风压符号的约定为:压力向内、向下为正,向外、向上为负。

2.5 风洞中的参考点位置

在风洞中选取一个不受建筑模型影响、离风洞洞壁边界层足够远的位置作为试验参考点,在该处设置了一根皮托管来测量参考点风压,用于计算各测点上与参考点高度有关但与试验风速无关的无量纲风压系数。试验参考点

选在高度为 1.0 m 处,该高度在缩尺比为 1:200 时所对应的实际高度为 200 m。

基于各类地貌所对应的梯度风高度虽然各不相同,但它们的梯度风速和梯度风压都相等这个原则,在实际应用中为了方便,都取梯度风压为参考风压。为此,必须把所有直接测得的风压系数换算成与地貌无关的梯度风压为参考风压的风压系数。规范规定,大气边界层中的风速剖面以幂函数形式表示,即

$$V_z=V_G(\frac{Z}{Z_G})^\alpha$$

(1)

式中: Z_G 为各类地貌所对应的梯度风高度(大气边界层高度); α 为反映各类地貌地面粗糙度特性的平均风速分布幂指数; V_G 为梯度风速度; V_z 为离地面高度 Z 处的风速。

本文中给出的风压系数均是以梯度风压为参考风压的风压系数。这样,实际应用时,将各点的风压系数统一与实际梯度风压相乘,即为该点对应的实

际风压。

3 梯度风高度的参考风速和参考风压

第 2 节中给出的风压系数是以梯度风压为参考风压的压力系数。按照规范,上海市在 B 类地貌、50 a 重现期、10 m 高度处、10 min 平均的基本风压为 $w_0=0.55\text{ kPa}$,相应的基本风速为 $V_{10}=\sqrt{1\,600w_0}=29.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;对应于 100 a 重现期的基本风压 w_0 为 0.60 kPa,相应的基本风速为 $31.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。B 类地貌对应的梯度风高度为 $Z_G=350\text{ m}$, $\alpha=0.16$,由此可得,梯度风速 $V_G=V_{10}(Z_G/10)^\alpha$ 和梯度风压 $p_G=\rho V_G^2/2$,结果见表 1。

表 1 按规范所得的参考梯度风速和风压
Tab.1 Reference Gradient Wind Velocity and Wind Pressure Gotten from Code

重现期/a	50	100
$V_G/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	52.4	54.7
p_G/kPa	1.715 8	1.871 8

注:规范中统一取 $\rho/2\approx 1/1\,600\text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

4 风压试验结果

4.1 平均风压系数

在空气动力学中,物体表面的风压通常用量纲为一的风压系数 C_{pi} 表示,即

$$C_{pi}=\frac{P_i-P_\infty}{P_0-P_\infty}$$

(2)

式中: C_{pi} 为测点 i 处的风压系数; P_i 为作用在测点 i 处的风压; P_0 和 P_∞ 分别为试验时参考高度处的总风压和静风压。

4.2 点体型系数

在某些结构分析标准软件中,必须输入规范定义的体型系数。为了适应这一需要,笔者将第 4.1 节中得到的平均风压系数,转换成各个测点的点体型系数(为了区别规范中的体型系数,以下称为点体型系数)。

规范中规定的作用在建筑物表面上高度 z 第 i 测点处的风荷载标准值的计算公式为

$$w_i=\beta_{zi}\mu_{si}\mu_{zi}w_{0R}$$

(3)

式中: β_{zi} 为高度 z 处的风振系数(本文中研究没有涉及该内容); μ_{si} 为测点 i 处的风荷载点体型系数; μ_{zi} 为测点 i 处的风压高度变化系数,对 C 类风场 $\mu_{zi}=(350/10)^{0.32}(400/z)^{0.44}$; w_{0R} 为基本风压,随重现期的不同取不同的值(下标 R 代表重现期,分别取为 50、100 a)。本文建筑对应于 50、100 a 重现期的

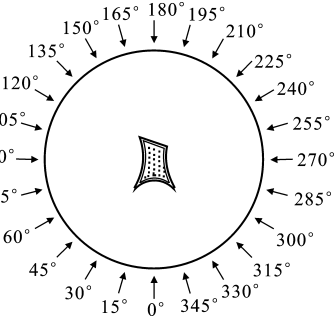


图 4 模型方位及风向角
Fig. 4 Angle of Model Orientation and Wind Direction

ω_{0R} 分别为 0.55、0.60 kPa。

根据本试验测得的各测点的平均风压系数 $C_{Pmean,i}$ (以梯度风高度风压为参考风压),可容易地换算得到各测点的点体型系数 μ_{si} ,即

$$\mu_{si} = C_{Pmean,i} (400/z)^{0.44} \quad (4)$$

根据式(4),可得出该项目各测点在 C 类风场各个风向角下的点体型系数。

5 用于围护结构设计的风压

5.1 基于规范方法的结果

按照中国规范和规程^[3]中作用在玻璃幕墙及围护结构上的风荷载标准值计算公式为

$$\omega_i = \beta_{gz} \mu_{si} \mu_{zi} \omega_0 \quad (5)$$

式中: β_{gz} 为阵风系数,按中国规范采用。规范中指出,围护结构的重要性与主体结构相比要低些,因此用于围护结构设计的基本风压选用 50 a 重现期的。若选用 100 a 重现期,则将以上 50 a 重现期结果乘以系数 1.091 即可。

对玻璃幕墙及围护结构等围护构件,应考虑到封闭结构门窗开启或局部玻璃意外损坏的情况而导致的内压修正^[4-7]。按照规范,封闭式建筑物内表面的局部体型系数按外表面风压的正负情况取 -0.2 或 0.2。笔者在计算封闭结构部分用于围护结构设计的风压时(包括第 5.2 节中的基于统计分析的结果),据此进行了相应的修正。

由此可得到各测点在各个风向角下用于围护结构设计的风压值。对于每个测点的风压值,分别找出所有风向角中的一个最大值和一个最小值,分别称为该测点的最不利正风压 ω_{max}^* 和最不利负风压(绝对值最大负压) ω_{min}^* ,用于围护结构设计。本文中试验各测点 50 a 重现期的 ω_{max}^* 和 ω_{min}^* 值分别见图 5、6。

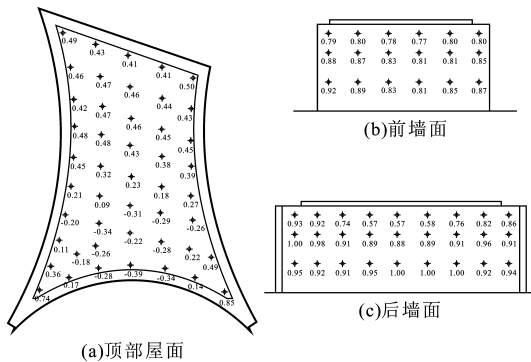


图 5 基于规范方法的 50 a 重现期最不利正风压
Fig. 5 Maximum Positive Wind Pressure for 50 a Return Period Based on Code Method

5.2 基于试验的统计分析结果

处于紊流场中的各测点的风压系数 C_{Pi} 是个随机变量,因此对各测点除了得到各个风向角下的平均风压系数 $C_{Pmean,i}$,对所记录的数据进行概率统计分析后,还可获得各测点各风向角下的脉动均方根风压系数 $C_{Prms,i}$ (以梯度风压为参考风压)^[8]。

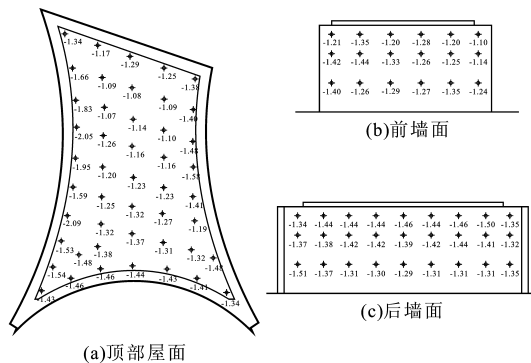


图 6 基于规范方法的 50 a 重现期最不利负风压
Fig. 6 Maximum Negative Wind Pressure for 50 a Return Period Based on Code Method

根据概率统计理论可知,各测点在某一风向来流的作用下,其风压系数的极大值 C_{Pmax} 和极小值 C_{Pmin} 可分别表示为

$$C_{Pmax} = C_{Pmean} + k C_{Prms} \quad (6)$$

$$C_{Pmin} = C_{Pmean} - k C_{Prms} \quad (7)$$

式中: k 为峰值因子, $k \in [2.5, 4]$,本文中取 $k=3.5$ 。

对于每个测点,在所有风向角对应的 C_{Pmax} 和 C_{Pmin} 中,总可以找到一个最大的 C_{Pmax} 和一个最小的 C_{Pmin} ,分别称为该测点的最大极值风压系数 \tilde{C}_{Pmax} 和最小极值风压系数 \tilde{C}_{Pmin} 。得到各测点的最大(最小)极值风压系数后,乘以梯度风高度参考风压,即得到了各测点的最大(最小)极值风压。

各测点 50 a 重现期的最大极值风压(基于统计方法的最不利正压)和最小极值风压(基于统计方法的最不利负压)分别如图 7、8 所示(进行了相应的内压修正)。

6 结 语

(1) 根据点体型系数得到的 10 min 平均风荷载是该项目整体结构设计的基本参数。

(2) 对于结构正风压来说,除了立面下侧小部分外,按试验统计方法得到的计算值比按规范方法计算的值为大,应作为设计荷载。

(3) 对于结构负风压来说,除了立面边角小部分外,按规范方法得到的计算值要比按试验统计方法得到的计算值大,应作为设计荷载。

(4) 由于本文试验是在目前的周边环境下进行

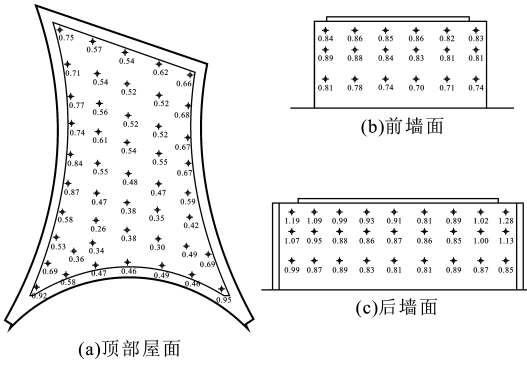


图 7 基于统计方法的 50 a 重现期最大极值风压
Fig. 7 Maximum Extremum Wind Pressure for 50 a Return Period Based on Statistics Method

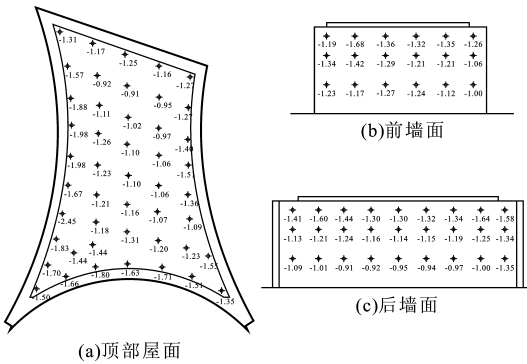


图 8 基于统计方法的 50 a 重现期最小极值风压
Fig. 8 Minimum Extremum Wind Pressure for 50 a Return Period Based on Statistics Method

的,因此严格地讲,所得到的风荷载只在此周边环境状况下才是正确的。当周边环境有较大改变时,风荷载分布也将发生变化,在设计时还要考虑这种潜在因素可能产生的影响。

参考文献:

References:

[1] GB 50009-2001, 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009-2001, Code for Building Structure Load[S].
[2] 黄 鹏,全 涌,顾 明. TJ-2 风洞大气边界层被动模拟方法的研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1999, 27(2): 136-140.

HUANG Peng, QUAN Yong, GU Ming. Research of Passive Simulation Method of Atmospheric Boundary Layer in TJ-2 Wind Tunnel[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1999, 27(2): 136-140.
[3] CECS 127: 2001, 点支式玻璃幕墙工程技术规程[S].
CECS 127: 2001, Code for Engineering Technology on Glassine Wall of Point Support Type[S].
[4] 武 岳, 陈 波, 沈世钊. 大跨度屋盖结构等效静风荷载研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 27-31.
WU Yue, CHEN Bo, SHEN Shi-zhao. Research on Equivalent Static Wind Loadings of Large-Span Roof Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 27-31.
[5] 沈蒲生, 刘 杨. 水平地震作用下框支剪力墙结构的变形研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 58-63.
SHEN Pu-sheng, LIU Yang. Distortion Research of Shear Wall Structure Supported on Frame Under Earthquake Actions[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 58-63.
[6] 楼文娟, 卢 旦, 孙炳楠. 风致内压及其对屋盖结构的作用研究现状评述[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 76-82.
LOU Wen-juan, LU Dan, SUN Bing-nan. Review of Wind-Induced Internal Pressure and Its Effects on Roof Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 76-82.
[7] 周 庆, 邹银生. 现浇混凝土空心楼盖受力特性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 57-60.
ZHOU Qing, ZOU Yin-sheng. Research on Force Resistance Properties of Cast-in-Situ Hollow Concrete Floor[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 57-60.
[8] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 上海北外滩中庭风荷载试验研究[R]. 上海: 同济大学, 2005.
State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering of Tongji University. Study of Wind Load Test on Atrium in Shanghai North Bund Hotel[R]. Shanghai: Tongji University, 2005.