

文章编号: 1001-4888(2013)02-0261-08

阻塞效应对高层建筑风洞试验的影响分析^{*}

王磊, 梁枢果, 邹良浩, 王述良

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 430072)

摘要: 风工程界对单体建筑风洞试验阻塞效应进行了大量研究并取得初步成果, 有关群体建筑风洞试验阻塞效应的研究却鲜有报道。基于此, 本文对具有较多周边建筑的某实际高层建筑进行了两种缩尺比的刚性模型测压试验。结果发现阻塞效应的不同使两组模型的风压数据出现显著差异。分析表明: 对于具有较多周边建筑的风洞试验, 较大阻塞比导致的阻塞效应可能引起试验数据严重失真, 阻塞效应对模型侧面风压的影响较迎风面、背风面更为显著; 现有的阻塞效应修正方法不具有普遍适用性, 阻塞比这一整体性指标无法描述模型不同部位的阻塞效应。

关键词: 阻塞效应; 矩形截面高层建筑; 风压系数; 风洞试验

中图分类号: TU317⁺.1; V211.71 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-12-039

0 引言

模型风洞试验以洞壁为边界, 而实际结构在大气中是无边界的, 在有界的风洞中(尤其是闭口风洞)模拟无界大气中的流场, 必然会带来洞壁干扰问题。风洞边界对模型绕流流场的横向约束称为“实体阻塞”, 对模型尾流流场的横向约束称为“尾流阻塞”。实体阻塞和尾流阻塞这两种洞壁干扰即为阻塞效应。阻塞效应在某些情况下对试验数据精度有严重影响, 以阻塞比为 15% 的翼一身组合体模型风洞试验为例, 迎角 90° 时, 阻力系数修正值达到被测值的 88%^[1]。Saathoff 和 Melbourne 对矩形截面建筑风洞试验进行研究发现: 在阻塞比为 5% 时, 侧面角点附近平均风压增大 15%, 根方差风压增大 20%^[2], 足见阻塞效应对试验数据的影响不可忽视。但事实上, 在建筑风洞试验中, 即便在阻塞比较大时, 其影响也常常被忽略^[3]。

航空和汽车风洞试验阻塞效应的修正已经发展得比较成熟, 常用的修正方法有镜像法、涡格法、壁面压力信息法^[4]和 Mercker 的半经验方法^[5]。但是, 由于飞机和汽车在外形等方面与矩形建筑的差异, 上述方法并不适用于矩形截面高层建筑的阻塞效应修正。

风工程研究者对于矩形截面建筑阻塞效应的研究也已有几十年的历史。早在 1978 年, Awbi 就在 Maskell 理论的基础上提出适用于二维矩形截面阻塞比的修正方法, 他认为在阻塞效应修正时应考虑矩形截面长宽比的差异, 长边迎风不出现再附时, 阻塞效应较短边迎风更为明显^[6]。Cherry, Melbourne 等也指出^[2,7], 钝体表面再附平均长度会随阻塞比增加而减小, Cherry 的试验结果显示, 5% 的阻塞比会使再附长度减小 20%。按照这种理论结果, 阻塞比不仅会影响表面风压大小, 还会影响风压分布。因此, 基于 Maskell 假设(该假设认为, 阻塞效应只影响风速大小而不影响风压分布)提出的阻塞效应机理及修正公式并没有受到广泛接受。此后, Saathoff^[2]、Hunt^[8]、Noda^[9]、Atsushi Okajima^[10] 等也先后对阻塞效应进行了专门的风洞试验或数值模拟研究。虽然大量学者关注并研究了阻塞效应对矩形

^{*} 收稿日期: 2012-03-19; 修订日期: 2012-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(90715023)资助

通讯作者: 梁枢果(1950—), 男, 硕士, 教授, 从事结构动力学、结构抗风的研究。E-mail: liangsgwhu@sohu.com

柱体的影响,并提出了相应的修正方法,但至今仍然没有一个风工程界普遍认可的矩形截面建筑风洞试验阻塞效应的理论及修正方法。

以上研究都是以矩形单体建筑作为对象进行试验研究,这些研究成果经归纳有以下特点:(1)普遍认为,阻塞效应对矩形柱体迎风面风压影响很小,对侧面和背风面影响较大,尤其是改变了侧面的风压分布。(2)所提出的阻塞效应的修正方法多是对来流动压的修正,这些方法并没有跳出 Maskell 假设的窠臼。通过本文的研究分析发现,上述结论并不完全适用于具有群体影响的实际工程的风洞试验。

1 风洞试验

试验在广东省建筑科学研究院 CGB-1 风洞低速试验段(3m 宽×2m 高)完成,该风洞为闭口风洞,试验风场为 C 类,其风场的平均风速和紊流度沿高度分布的模拟结果分别见图 1 和图 2。图 3 为建筑周边总平面图,主体测压建筑为高 237m 矩形截面高层建筑,其周边建筑较为特别,百米以上高层共 9 个,其中 A 大厦 212m、B 大厦 240m、C 大厦 331m。图 4 为某 1/300 超高层建筑及周边建筑风洞试验测压模型布置图,图 5 为其 1/200 风洞试验测压模型布置图,两组模型几何相似仅尺寸不同。在 0°风向角时,阻塞比(S/C :建筑物有效迎风面积 S 与风洞截面面积 C 的比值)达到最大,1/200 和 1/300 两模型的整体阻塞比*分别为 15.2%和 6.7%,断面阻塞比**分别为 11.6%和 5.1%。本文分别分析了同一测压面在不同风向角的风压数据,即 270°风向角迎风面、0°风向角左侧面、90°风向角背风面(如图 6),选取了 8 行×7 列个测点来分析。

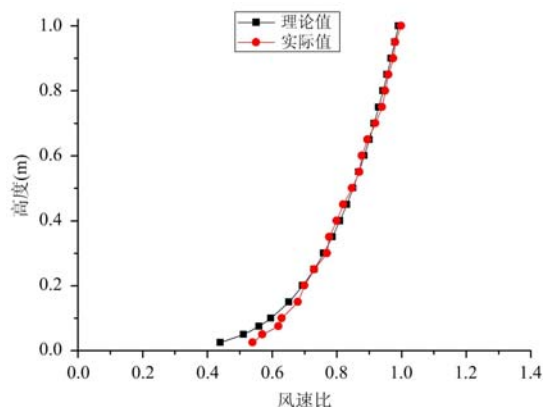


图 1 C 类风场平均剖面

Fig. 1 Wind profile of C wind field category

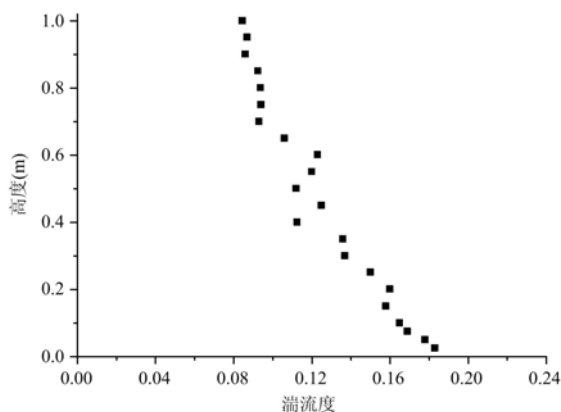


图 2 C 类风场湍流度

Fig. 2 Turbulence intensity of C wind field category

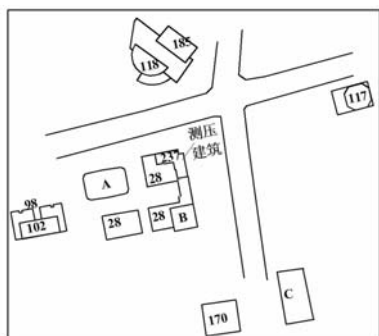


图 3 建筑周边图

Fig. 3 Layout of surroundings



图 4 1/300 试验模型

Fig. 4 1/300 experimental models

* 全部建筑模型在来流断面的投影面积与风洞截面面积的比值。

** 被测建筑横截面处的建筑模型在来流断面的投影面积与风洞截面面积的比值。

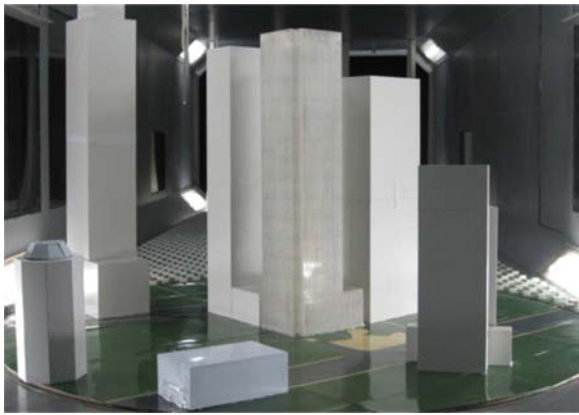


图5 1/200 试验模型

Fig. 5 1/200 experimental models

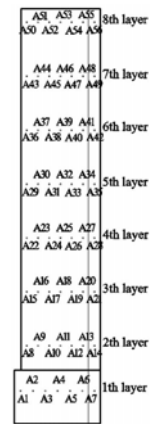


图6 测点布置图

Fig. 6 Layout of test points

2 试验数据分析

2.1 平均风压系数

图7、图8、图9分别为迎风面、背风面、侧面各测点平均风压系数,各图中横坐标为测点号,测点1~7为底端数第一层,测点8~14为底端数第二层,依此类推。1/300模型的风压系数与我国建筑规范比较接近,为方便分析,此处称1/200和1/300模型的风压系数差值为绝对差值,绝对差值与1/300模型的风压系数之比称为相对差值(见式(1)~(4)),图10即为迎风面、背风面、侧面风压系数每一层的相对差值,即以同一层内各点体型系数的加权平均值为分析对象。

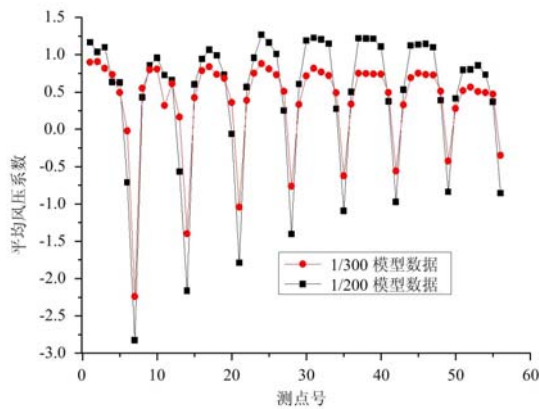


图7 迎风面平均风压系数

Fig. 7 Mean along wind pressure coefficient

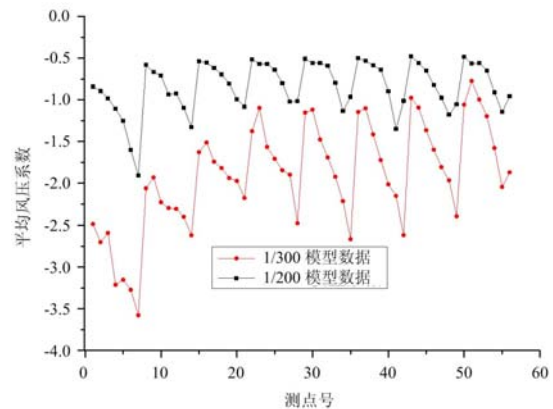


图8 侧面平均风压系数

Fig. 8 Mean lateral wind pressure coefficient

测点试验风压平均值:

$$\bar{w} = \left(\sum_{i=1}^N w_i \right) / N \quad (1)$$

测点平均风压系数:

$$\mu_s = \frac{\bar{w}}{w_{h_{ref}}} \left(\frac{h_{ref}}{h} \right)^{2\alpha} \quad (2)$$

测点平均风压系数绝对差值:

$$\Delta_1 = | \mu_{200} - \mu_{300} | \quad (3)$$

测点平均风压系数相对差值:

$$\Delta_2 = | \mu_{200} - \mu_{300} | / | \mu_{300} | \quad (4)$$

式中, 1/200 模型测点试验风压平均值 $\bar{w}$ 对应 1/200 模型的测点风压系数 μ_{200} ; 1/300 模型测点试验风压平均值 $\bar{w}$ 对应 1/300 模型的测点风压系数 μ_{300} 。 h_{ref} 为试验参考点高度; $\bar{w}_{h_{ref}}$ 为参考点风压; N 为测点风压时程样本的数据数; w_i 为测点 i 瞬时的风压值。

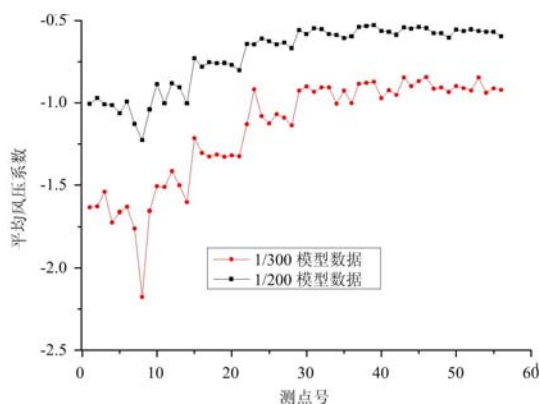


图 9 背风面平均风压系数

Fig. 9 Mean leeward wind pressure coefficient

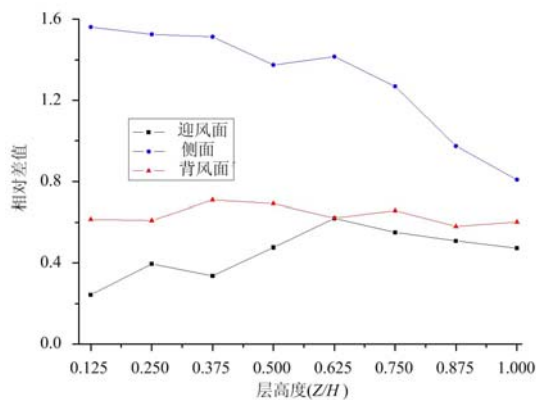


图 10 平均风压系数相对差值

Fig. 10 Relative difference of mean wind pressure coefficient

从图 7~9 可以看出: (1) 1/200 测压模型平均风压系数绝对值远大于 1/300 测压模型的平均风压系数绝对值。(2) 图 7 中, 两测压模型平均风压系数曲线升降规律较为一致, 说明阻塞比的不同并没有显著引起迎风面压力分布的变化。图 8 中, 两曲线走势有很大差别, 峰值位置也不相同, 说明阻塞效应对侧面风压有显著影响。(3) 随着高度增加, 二者之间的差值呈减小趋势。需要说明的是, 迎风面部分测点出现负值是由建筑物边缘处倒角及周边干扰所致。事实上, 1/300 的模型仍具有 6.7% 的阻塞比, 也必然存在阻塞效应, 也就是说, 1/200 的模型的试验数据与正确值的差别应该更大。

从图 10 可以看出, 侧面风压系数相对差值最大, 迎风面和背面次之, 并且侧面相对差值随高度增加大致呈减小趋势, 迎风面相对差值随高度变化先增加而后减小。究其原因, 可做如下解释: 侧面风压为受到测压模型本身及周边模型阻塞影响之后的气流风压, 被阻塞而加速的气流必然引起压力系数增大, 并且阻塞程度沿高度减小使得相对差值沿高度递减。对迎风面而言, 底部一定高度范围内阻塞程度最为严重, 根据边界层流体运动基本特点, 这种底部阻塞不会显著影响引起该处的流速变化, 只对远离该处的较高处流线有显著影响。因而测压模型中部流速变化最大; 接近顶部时这种影响变小, 加之该高度处阻塞程度较小, 故顶部几行测点平均风压系数的相对差值不大, 最终使得迎风面相对差值随高度呈现先增加后减小的趋势。可见, 阻塞比虽然在定义上为一个整体概念, 但事实上, 对于有周边建筑物的风洞试验, 阻塞程度的沿高变化极大地影响了阻塞效应的定量分析, 这也是既有修正方法不适用于实际工程风洞试验的原因之一。

2.2 根方差风压系数

各测点均方根风压系数及其差值可由式(5)、(6)算得:

测点试验风压根方差值:

$$w_{\sigma} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N w_i^2 - N\bar{w}^2}{N} \right]^{0.5} \quad (5)$$

测点根方差风压系数:

$$\mu_{\sigma} = \frac{w_{\sigma}}{w_{h_{ref}}} \left(\frac{h_{ref}}{h} \right)^{2\alpha} \quad (6)$$

测点根方差风压系数绝对差值:

$$\Delta_{\sigma} = | \mu_{\sigma 200} - \mu_{\sigma 300} | \quad (7)$$

测点根方差风压系数相对差值:

$$\Delta_d = |\mu_{s200} - \mu_{s300}| / |\mu_{s300}| \quad (8)$$

式中, 1/200 模型测点试验风压根方差值 ω_s 对应 1/200 模型测点风压系数为 μ_{s200} ; 1/300 模型测点试验风压根方差值 ω_s 对应 1/300 模型的测点风压系数为 μ_{s300} 。

图 11、图 12、图 13 分别为迎风面、背风面和侧面各测点根方差风压系数对比图。图 14 为迎风面、背风面和侧面风压系数的相对差值, 从图 14 可以看出: 迎风面和背风面的根方差风压系数的相对差值较小, 侧面的相对差值很大。可见阻塞效应极大地增加了湍流程度, 也使得极值风压显著增大, 事实上, 1/200 测压模型建筑的根方差风压已严重失真, 由此而得到的极值风压也不能用于工程抗风评估。从图 14 还可以看出, 三个面的根方差风压系数的相对差值都呈现出沿高度的明显变化, 其变化规律与平均风压系数变化规律比较一致。

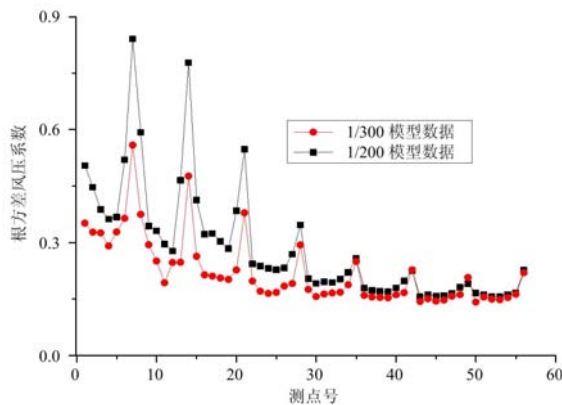


图 11 迎风面根方差风压系数

Fig. 11 RMS along wind pressure coefficient

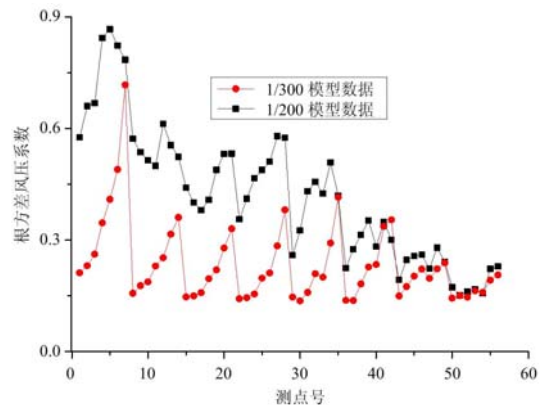


图 12 侧面根方差风压系数

Fig. 12 RMS lateral wind pressure coefficient

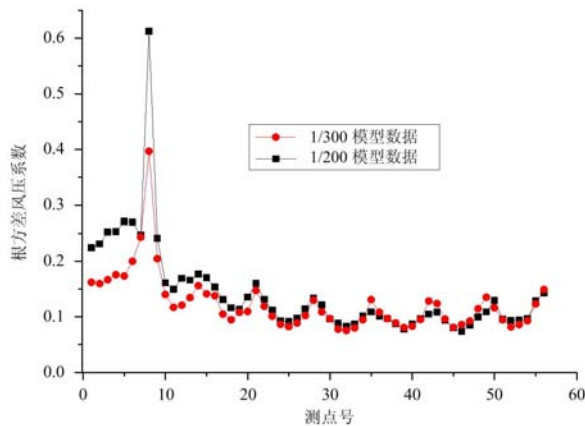


图 13 背风面根方差风压系数

Fig. 13 RMS leeward wind pressure coefficient

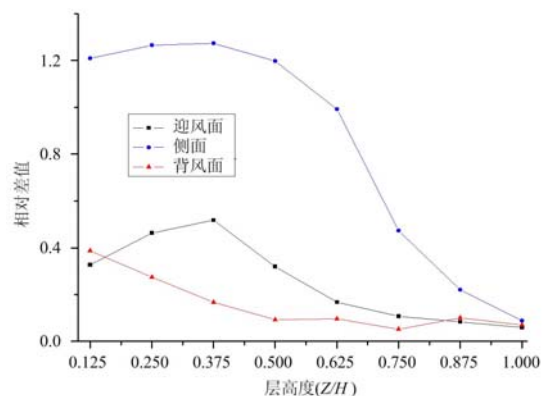


图 14 根方差风压系数相对差值

Fig. 14 Relative difference of RMS wind pressure coefficient

2.3 修正参考风压后的数据结果

现有的阻塞效应修正方法有很多种, 但大都是对风压数据进行整体上的比例修正。文献[11]认为, 模型阻塞使得流经模型处的气流风速比空载风洞的标定略高, 在计算风压系数时对流经模型处的动压所进行的修正方式为: $q = q_0(1 + 1.25\epsilon)$ 。其中, q_0 为空风洞时流经模型处动压; ϵ 为阻塞比。这种修正方法实际上是将风压系数乘上了一个小于 1 的调整系数。这种修正方法扩展应用于建筑结构风洞试验, 其实就等同于对参考点风速进行修正。本文采用文献[11]的方法对实验数据进行了修正。

图 15 和图 16 显示了修正参考点风压后的平均风压系数相对差值和根方差风压系数相对差值。可以看出, 修正后的相对差值相比修正前有所减小, 但减小量只在 10% 左右, 并且对参考点风速的修正只

是将测压数据做整体上的比例调整,而不考虑迎风面、背风面、侧面的差异及其他因素。这就是说,参考点风压的误差影响只是数据畸变的一小部分原因,或者说单纯依靠参考点风压的修正无法从根本上消除阻塞效应的影响。

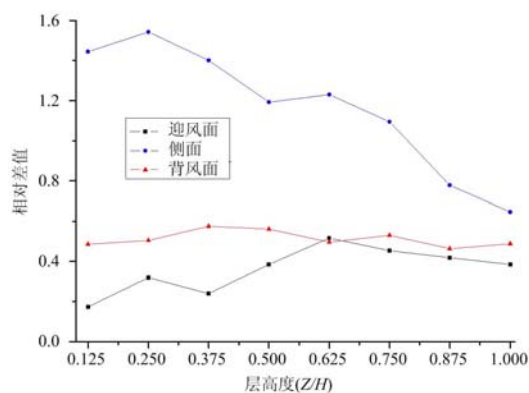


图 15 修正参考风压后
平均风压系数相对差值

Fig. 15 Relative difference of
the mean wind pressure
correcting reference pressure

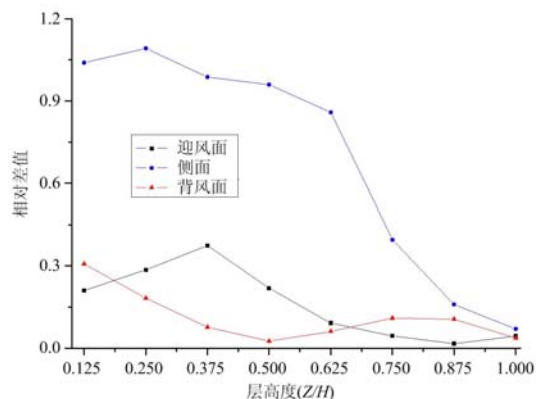


图 16 修正参考风压后
根方差风压系数相对差值

Fig. 16 Relative difference of the RMS wind
pressure coefficient with coefficient with
correcting reference pressure

3 数据畸变原因分析

近年来国外的相关研究发现,雷诺数效应对方截面及矩形截面柱体模型的表面风压有一定影响^[12-15]。本次试验中,1/200 和 1/300 比例模型的雷诺数分别为 1.33×10^5 和 8.88×10^4 。风洞试验和数值模拟研究表明^[16,17],在 10% 至 20% 均匀紊流场中雷诺数效应的影响较大,而对于 C、D 类风场,雷诺数效应的影响明显减小,并且本实验中两雷诺数差别并不大,根据文献[16]的风洞试验数据,雷诺数效应引起的这两种比例模型表面风压的差异相当小。

试验风场会很大程度上影响风洞试验数据,尤其是参考点位置的设置。本试验在广东建科院风洞中进行,该风洞对不同类型的风场均有其成熟而固定的设置,参考点都是放置在转盘左前方的同一位置。考虑参考点处风速与转盘中心处风速有所不同,在实验数据初步处理时,已对此进行了修正。作此修正后,参考点风速还会受不同阻塞程度的影响而出现不同程度的减小,本文应用常用的参考点风速修正方法^[11]进行修正后,也只能使两种比例模型的风洞试验数据相对差值减小 10% 左右。

以上两因素是影响风洞试验数据较为重要的原因,此外还有静压分布不均匀性等因素。鉴于这些因素的影响程度和特点与本次试验的数据畸变情况并不一致,本文认为阻塞效应本身是试验数据失真的主导原因。

4 结论

(1) 阻塞效应对风压数据的影响不可忽视,在阻塞比较大时,阻塞干扰引起的压力系数变化量甚至超过无干扰时标准压力值的一倍。

(2) 阻塞效应对侧面风压的影响最大,并在一定程度上改变了侧面风压分布,对迎风面和背风面的影响相对较小。

(3) 在具有较多低于测压模型的周边建筑的风洞试验中,阻塞效应对风压系数的影响沿高度明显变化,进行阻塞效应修正时,须考虑不同高度处的阻塞程度及其相关性。

(4) 对有周边的矩形截面建筑风洞试验,阻塞效应机理复杂,至今未有普适性的理论和修正方法,合理确定模型比例以控制阻塞效应尤为重要。

参考文献:

- [1] 恽起麟. 风洞试验数据的误差与修正[M]. 北京:国防工业出版社, 1996 (Yun Qilin, Error Analysis and Correction for Wind Tunnel Testing Data [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996(in Chinese))
- [2] Saathoff P J, Melbourne W H. Freestream Turbulence and Wind Tunnel Blockage Effects on Streamwise Surface Pressures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1987, 26(3):353—370.
- [3] Robertson J M, Wedding J B, Peterka J A, et al. Wall pressures of separation-reattachment flow on a square prism in uniform flow[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1978, 3(4):345—359.
- [4] 波普, 哈珀 著. 彭锡铭 等译. 低速风洞试验[M]. 北京:国防工业出版社, 1978 (Pope A, Harper J. Low-speed Wind Tunnel Test[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1978 (in Chinese))
- [5] Merker E. A Blockage Correction For Automotive Testing in a Wind Tunnel with Close Test Section[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1986, 22(2-3): 149—167.
- [6] Awbi H B. Wind-tunnel-wall constraint on two-dimensional rectangular-section prisms[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1978, 3(4): 285—306.
- [7] Cherry N J. The effects of stream turbulence on a separated flow with reattachment[J]. Ph. D. Thesis, Imperial College, University of London, 1982.
- [8] Hunt A. Wind-tunnel measurements of surface pressures on cubic building models at several scales[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1982, 10(2):137—163.
- [9] Noda M, Utsunomiya H, Nagao F. Basic study on blockage effects in turbulent boundary layer flows[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 54&55: 645—656.
- [10] Atsushi Okajima, Donglai Yi, Atsushi Sakuda, et al. Numerical study of blockage effects on aerodynamic characteristics of an oscillating rectangular cylinder[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 67&68:91—102.
- [11] 吴德伦, 王金海, 冯翼然 等. 我国高耸木塔风力特性实验研究[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1991, 3(1):15—21 (Wu Delun, Wang Jinhai, Fing Yiran, et al. An Experimental Research for the Wind Behavior of a Hish-rise Wooden Pagoda in China[J]. Journal of Chongqing Institute of Architecture and Engineering, 1991, 3(1):15—21 (in Chinese))
- [12] Larose G L, Auteuil A D. On the Reynolds number sensitivity of the aerodynamics of bluff bodies with sharp edges[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(5): 365—376.
- [13] Okajima A. Strouhal number of rectangular cylinders[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 123:379—398.
- [14] Tamura T, Miyagi T. The effect of turbulence on aerodynamic forces on a square cylinder with various corner shapes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83:135—145.
- [15] Sohanker A. Flow over a bluff body from moderate to high Reynolds number using large eddy simulation[J]. Computer & Fluids, 2006, 35(10):1154—1168.
- [16] 陈寅. 矩形截面超高层建筑风荷载雷诺数效应的风洞试验研究[D]. 武汉大学博士学位论文, 2010 (Chen Yin. Investigation Reynolds number effect of wind loads on rectangular high-rise wind by tunnel test study[D]. MD, China; Wuhan University, 2010 (in Chinese))
- [17] 张冬兵. 矩形截面建筑风荷载雷诺数效应数值模拟研究[D]. 武汉大学博士学位论文, 2010 (ZHANG Dongbin. Inverstigation on reynolds numbers of wind loads on rectangular haigh-rise buildings by numbercal simulation[D]. MD, China; Wuhan University, 2010 (in Chinese))

Investigation on Blocking Effect of High-Rise Building in Wind Tunnel Experiment

WANG Lei, LIANG Shu-guo, ZOU Liang-hao, WANG Shu-liang

(School of Civil & Building Engineering, Wuhan University, Hubei 430072, China)

Abstract: Investigation on blocking effect of single building with rectangular cross-section was carried out extensively and achieved initial success. However, it is rarely reported about the investigation on the blocking effect of group of buildings in tunnel experiment. Therefore, pressure measurement was carried out for a practical rigid model with many surrounding buildings based on two different scale ratios. It was found that the pressure data of two models are significantly different due to the blocking effect. Analysis results show that, for wind tunnel model experiment with more surrounding buildings, blocking effect may results in serious data distortion. The blocking effect on side air pressure is more serious than that on windward side and leeward side air pressure. Existing correction method of blocking effect does not have general applicability. Moreover, the blocking ratio, as a global index, cannot describe the blocking effect at different positions on a mode.

Keywords: blocking effect; high-rise building with rectangular cross-section; wind pressure coefficient; wind tunnel experiment