

等高双方柱平均风压的阻塞效应

黄 剑, 顾 明, 全 涌

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于同步测压技术, 在均匀流场中研究了等高双方柱在 3 种不同布置情况下平均风压的阻塞效应. 群体建筑投影面阻塞度的变化范围为 2.7%~10.0%. 风洞试验结果表明, 在均匀来流中, 群体建筑平均风压系数的阻塞效应和单体建筑的较为相似, 阻塞效应对模型迎风面平均风压的影响可以忽略; 但侧面和背风面平均负压随阻塞度增加显著增大. 此外, 基于风洞试验结果拟合了平均风压修正公式中的阻塞效应调整因子. 对比单体建筑, 群体建筑的阻塞效应调整因子更小, 阻塞效应更加复杂.

关键词: 阻塞效应; 风洞试验; 高层建筑; 平均风压

中图分类号: TU 317.1; TU 973.32

文献标志码: A

Blockage Effects on Mean Wind Pressure of Two Square Cylinders of Same Height

HUANG Jian, GU Ming, QUAN Yong

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Blockage effects on mean wind pressure of two square cylinders of the same height in three different layouts in uniform flow were investigated using the synchronous wind pressure measurement technique. Blockage ratios of projected areas of the building group change from 2.7% to 10.0%. The wind tunnel test results show that in uniform flow, the blockage effects on the mean pressure coefficient of the building group are similar to that of an isolated tall building. The blockage effects on mean pressure of the windward surface of the target building can be ignored, while those of side surfaces and leeward surface increase significantly with the increase of blockage ratio. In addition, adjustment factors in the formula for correcting blockage effects on mean pressure coefficient were fitted based on wind tunnel test results. Compared with an isolated building, adjustment factors for blockage effects of the building group are smaller, and blockage effects are more complicated.

Key words: blockage effect; wind tunnel test; tall building; mean wind pressure

随着现代城市的发展, 体型高大的建筑层出不穷, 风荷载对其影响不容忽视. 风洞试验是结构风工程研究最为重要的手段之一. 现代建筑通常以建筑群的形式存在, 群体建筑风洞试验时阻塞度往往较大. 通常认为将模型的阻塞度控制在 5% 以内, 引起的阻塞效应可忽略不计^[1]. 但这并无明确的依据可言. 阻塞效应如何影响建筑流场特性和气动特性, 尚无明确结论.

至今涉及建筑结构风洞试验阻塞效应的研究较少, 主要针对单体模型^[2-12], 较多关注于平均阻力系数的修正, 并提出了一些修正方法. 对于带有周边的高层建筑的阻塞效应的研究可谓“凤毛麟角”. 王磊等^[13]基于某高层群体建筑实际工程项目, 对两种缩尺比的刚性测压模型进行风洞试验, 比较了测点的平均和脉动风压系数, 认为阻塞效应对风压数据的影响不可忽视.

为了探索群体高层建筑风洞试验的阻塞效应, 本文以两栋高层建筑模型为试验对象, 在均匀来流中进行了刚性模型同步测压试验研究. 为了更好地反映真实情况下群体建筑的布置方案, 选取了 3 种基本周边建筑布置方式: 相对于目标建筑并列布置、上游布置、下游布置. 分别在上述工况下进行目标建筑平均风压系数的阻塞效应分析, 并对比了不同工况下的分区结果. 基于这些结果, 对平均风压系数阻塞效应修正公式进行参数拟合. 最后将本文结果和单体建筑阻塞效应的试验结果进行比较, 结果表明, 与单体高层建筑不同, 带有周边建筑的高层建筑阻塞效应在不同位置是变化的, 变化规律更加复杂, 用相同的阻塞效应调整因子来修正所有测点的平均风

收稿日期: 2014-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(91215302, 90715040)

第一作者: 黄 剑(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为超高层建筑结构抗风. E-mail: huangjiannt@126.com

通讯作者: 顾 明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土木工程抗风. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

压系数会产生一定误差.

1 风洞试验概况

1.1 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 TJ-2 大气边界层风洞中完成。该风洞试验段长 15.0 m, 宽 3.0 m, 高 2.5 m, 风速为 0.5~60.0 m·s⁻¹ 连续可调。本文通过改变模型缩尺比来调整阻塞度, 若采用大气边界层湍流场需在每种阻塞度下单独调整风场, 过程较为复杂且结果受风场的影响较大。为了排除来流的影响, 在试验中采用相同的均匀风场, 控制来流风速为 12.0 m·s⁻¹。目标建筑位于风场中心位置, 图 1 为模型位置处平均风速和湍流度剖面。

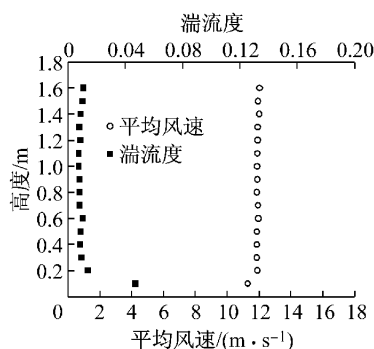


图 1 平均风速和湍流度剖面

Fig.1 Profiles of mean wind velocity and turbulence intensity

1.2 模型概况

风洞试验模型采用 7 种缩尺比, 周边建筑尺寸与目标建筑相同。目标建筑模型尺寸和周边建筑模型并列布置时对应的总阻塞度见表 1。目标模型的测点布置见图 2 和图 3。在各种工况下目标建筑表面的名称见图 4。本文仅在目标建筑正对来流的情况下进行试验。试验中不同阻塞度工况下目标建筑模型的测点较多, 导致数据分析繁杂, 故必须有针对性地简化。同时为了更清晰地展现高层建筑平均风压的主要规律, 将目标建筑每个立面区域根据风压分布特征进行分块处理并将每个立面分为 9 块区域(涵盖所有测点)进行研究, 各块区域的测点范围如图 2 所示。图中空心圆圈代表测点, 虚线所分隔的区域为分块区域。

试验模型全部采用 4 mm 厚有机玻璃板制作, 测点钻孔直径为 1.1 mm, 测压管与扫描阀之间用 PVC 管连接, 为避免测压管长度不同或管道过长带

来的误差,各模型测压管长度均为 1 000 mm,试验数据采用相同的管道修正函数来修正^[14].

表 1 模型尺寸

Tab.1 Model dimensions

目标建筑编号	边长 B/mm	高度 H/mm	阻塞度/ $\%$
M1	130	780	2.7
M2	158	948	4.0
M3	182	1 092	5.3
M4	194	1 164	6.0
M5	204	1 224	6.7
M6	224	1 344	8.0
M7	250	1 500	10.0

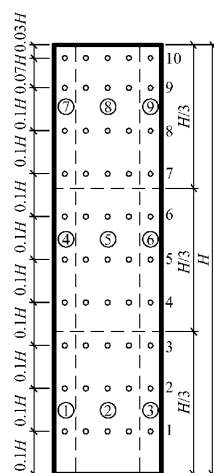


图 2 模型立面测点及分块示意图

Fig.2 Tapping location and blocking region of elevation

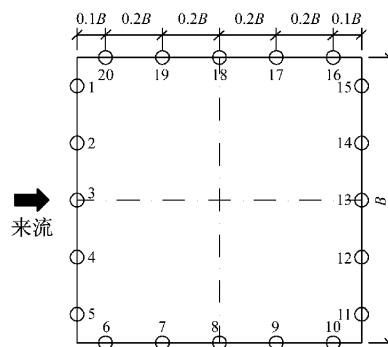


图 3 层测点示意图

Fig.3 Tapping locations of each layer

1.3 试验工况

实际情况中周边建筑布置形式和周边建筑的外形各不相同,为方便试验研究,并得到探索性的试验结果,本文仅选取了图 5 所示的 3 种典型周边布置方案:周边建筑与目标建筑并列布置、周边建筑布置在目标建筑上游和下游。由于试验所选取的周边建筑和目标建筑的间距较大,所以干扰效应并不显著。此外,认为干扰效应不随阻塞度的变化而变化,仅阻

塞效应导致某种工况下试验结果的差异. 周边建筑外形与目标建筑相同. 表 2 为各工况列表.

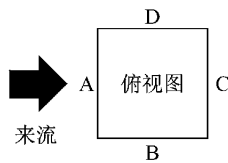


图 4 目标建筑表面命名

Fig.4 Surface names of target building

表 2 试验工况列表

Tab.2 Test case

工况编号	周边建筑布置方式
工况 1	并列布置
工况 2	上游布置
工况 3	下游布置

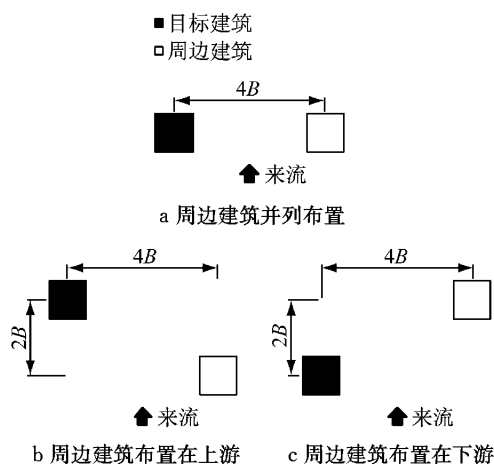


图 5 周边建筑布置俯视图

Fig.5 Vertical view of building configuration

2 试验数据分析

2.1 平均风压系数

首先介绍在最小阻塞度下目标建筑 M1 各个表面平均风压系数分布特征, 认为在此时阻塞效应对平均风压系数的影响可以忽略.

图 6 为工况 1 下目标建筑 M1 各面平均风压系数分布等值线图. 由图 6 可见, 当周边建筑并列布置在目标建筑侧面 $4B$ 位置时, 迎风面 A 面平均正风压具有良好的对称性, 不受周边建筑的影响. 此外, 在均匀流场中, 高层建筑迎风面的平均风压在中间段范围内有很强的二维流动特征. 两侧面的风压分布规律相似, 随着高度增加负压增大, 并且负压在上风区小于下风区. B 面的负风压要大于 D 面相应位置. C 面的平均负压随高度增加逐渐增大, 且分布基本对称, 仅在靠近周边建筑一侧负压略有增大.

风压要大于 D 面相应位置, 主要是两建筑之间的“峡谷效应”增大了流速所致. 背风面 C 面的平均负压随高度增加逐渐增大, 且分布基本对称, 仅在靠近周边建筑一侧负压略有增大. 由于周边建筑与目标建筑距离较大, 干扰效应较弱.

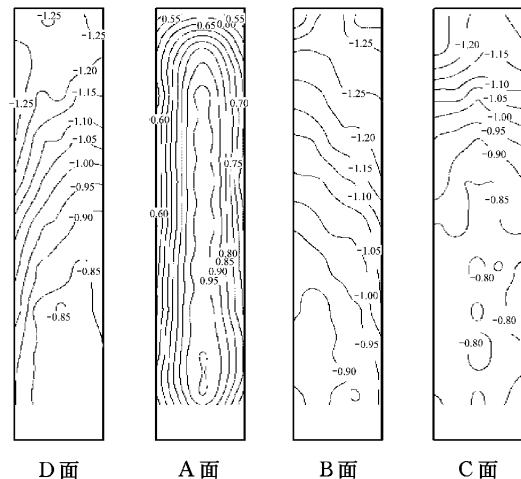


图 6 平均风压系数等值线图(工况 1)

Fig.6 Contours of mean pressure coefficient (case 1)

图 7 为工况 2 下目标建筑 M1 各面平均风压系数分布的等值线图. 由图 7 可见, 当周边建筑布置在目标建筑前方 $2B$ 、侧面 $4B$ 位置时, A 面平均正风压具有良好对称性, 没有受到周边建筑的影响, 并且此时 A 面平均风压的数值与周边建筑并列布置时接近. 两个侧面的风压分布规律相似, 随着高度增加负压增大, 并且负压在上风区小于下风区. B 面的负风压要大于 D 面相应位置. C 面的平均负压随高度增加逐渐增大, 且分布基本对称, 仅在靠近周边建筑一侧负压略有增大.

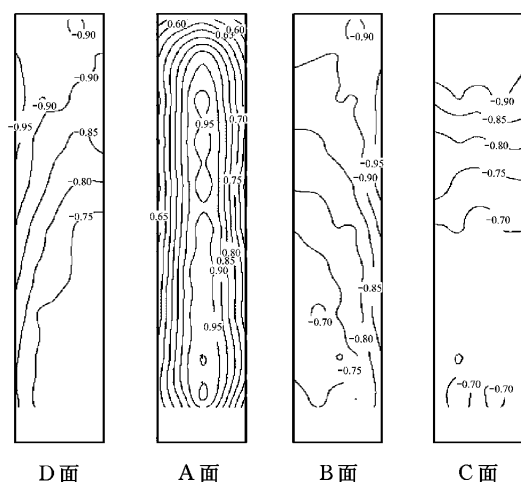


图 7 平均风压系数等值线图(工况 2)

Fig.7 Contours of mean pressure coefficient (case 2)

图 8 为工况 3 下目标建筑 M1 各面平均风压系

数分布的等值线图。由图8可见,当周边建筑布置在目标建筑后方2B、侧面4B位置时,A面平均正风压具有良好的对称性,没有受到周边建筑的影响,并且此时A面平均风压的数值与周边建筑并列布置时接近。两个侧面的风压分布规律相似,随着高度增加负压增大,并且负压在上风区小于下风区。B面后缘处的负风压要大于D面相应位置。C面的平均负压随高度增加逐渐增大,且分布基本对称,仅在靠近周边建筑一侧负压略有增大。B面和C面靠近周边建筑处负压增大的主要原因是该处附近流线由于周边建筑的出现发生弯折。

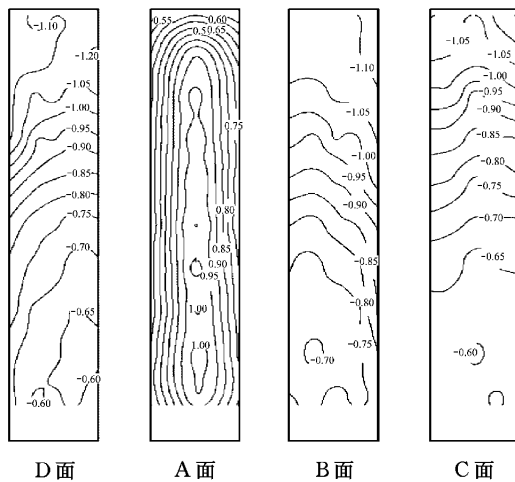


图8 平均风压系数等值线图(工况3)

Fig.8 Contours of mean pressure coefficient (case 3)

总体看来,在3种工况下,迎风面平均正压的分布规律和数值比较相近;侧面和背风面负压的分布规律较为接近,当周边建筑并列布置时,侧面和背风面负压的数值最大;当周边建筑布置在下游时,侧面和背风面负压的数值最小。由于试验中选取的周边建筑和目标建筑的间距较大,干扰效应并不显著,可以只考虑阻塞效应给试验结果带来的影响。

2.2 平均风压系数的阻塞因子

在分析阻塞效应时,以平均风压系数的阻塞因子为指标,其定义为阻塞状态下建筑平均风压系数与自由边界中建筑平均风压系数的比值。对于每一种工况,阻塞度最小的模型M1阻塞效应较小,将其作为自由边界的情况与其他阻塞度的状况对比。

各工况下阻塞效应对迎风面A面测点平均风压的最大影响幅度为:工况1为5%、工况2为5%、工况3为8%,并且影响最大的区域都在建筑角部附近。由于此位置与旋涡脱落有关,存在一定的不确定性,且其附属面积较小,对建筑整体风压和风力的影响很小,所以认为阻塞效应对迎风面平均风压的影响可以忽略。在下文阻塞效应的研究中不再考虑A面。

图9为工况1目标建筑各面分区平均风压系数阻塞因子随阻塞度的变化规律。由图9可见:

在B面,各区域平均风压系数阻塞因子随阻塞度增加呈增大的趋势。当阻塞度为4.0%~5.3%时,各区域阻塞因子的增加较为缓慢;当阻塞度为5.3%~8.0%时,各区域阻塞因子增大较为明显;当阻塞度为8.0%~10.0%时,阻塞因子的增加变得平缓。当阻塞度为4.0%时,各区域阻塞因子均小于1.10;当阻塞度为5.3%时,各区域阻塞因子范围是1.03~1.13;当阻塞度为6.0%时,各区域阻塞因子范围是1.07~1.15;当阻塞度为6.7%时,各区域阻塞因子范围是1.09~1.28;当阻塞度为8.0%时,各区域阻塞因子范围是1.26~1.43;当阻塞度为10.0%时,各区域阻塞因子范围是1.28~1.45。

在D面,各区域平均风压系数阻塞因子与B面的规律相似,在数值上有差别。当阻塞度为4.0%时,各区域的平均风压系数阻塞因子均小于1.10;当阻塞度为5.3%时,各区域阻塞因子范围是1.05~

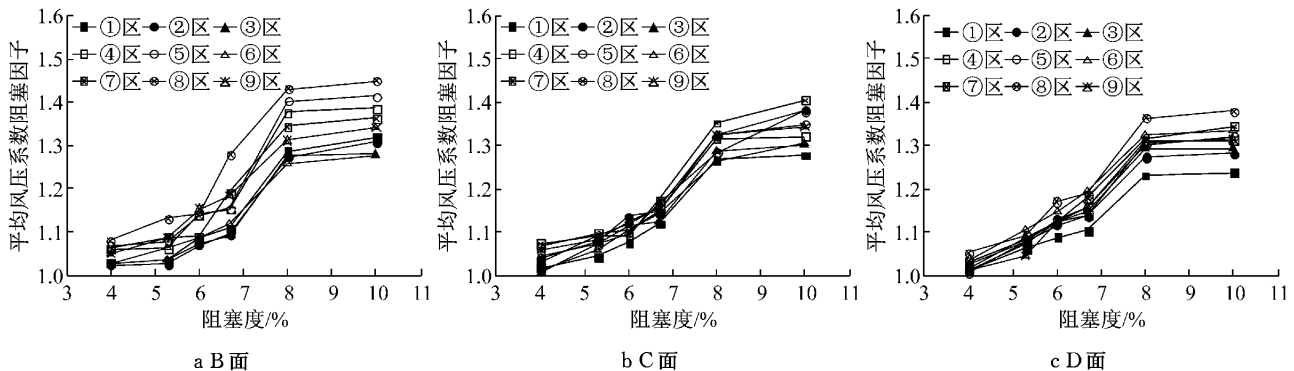


图9 分区平均风压系数阻塞因子(工况1)

Fig.9 Blockage factors of mean pressure coefficients for blocking areas (case 1)

1.11;当阻塞度为6.0%时,各区域阻塞因子范围是1.09~1.17;当阻塞度为6.7%时,各区域阻塞因子范围是1.10~1.20;当阻塞度为8.0%时,各区域阻塞因子范围是1.23~1.36;当阻塞度为10.0%时,各区域阻塞因子范围是1.24~1.38.在相同阻塞度下,B面各区域阻塞因子比D面对应区域的稍大.这表明当周边建筑与目标建筑并列布置时,两建筑之间的“峡谷效应”增大了相邻侧面平均风压的阻塞程度,两建筑之间通过的气流流速增大幅度比没有周边建筑一侧风洞截面流速增幅大.

在C面,各区域平均风压系数阻塞因子与B,D面的规律相似.当阻塞度为4.0%时,各区域的平均风压系数阻塞因子均小于1.10;当阻塞度为5.3%时,各区域阻塞因子范围是1.04~1.10;当阻塞度为6.0%时,各区域阻塞因子范围是1.08~1.14;当阻塞度为6.7%时,各区域阻塞因子范围是1.12~1.17;当阻塞度为8.0%时,各区域阻塞因子范围是1.26~1.35;当阻塞度为10.0%时,各区域阻塞因子

范围是1.28~1.41.在相同阻塞度下,目标建筑中、上部区域的阻塞因子在不同阻塞度下较下部区域的数值大.可见,气流分离流经C面时,在目标建筑中、上部位置风速增大较为明显.

由以上结果可见,周边建筑并列布置时,群体建筑的阻塞效应对侧面和背风面各区域平均风压的影响规律相似,均随阻塞度增加而增大.当阻塞度为4.0%~8.0%时,阻塞因子逐渐增大,主要原因为模型位置处风洞截面减小,来流加速;当阻塞度为8.0%~10.0%时,阻塞因子增幅平缓,这可能因为当阻塞度增大到一定程度,来流倾向于从风洞中更加空旷的上部空间通过,所以在模型两侧的空间内流速的增大并不是很明显.关于这一解释需要进一步的试验来验证.目标建筑B面的平均风压阻塞因子比C面和D面的大,这主要是受周边建筑影响,两建筑之间产生了显著而复杂的气流增大现象所致.

图10为工况2目标建筑各面分区平均风压系数阻塞因子随阻塞度的变化规律.由图10可见:

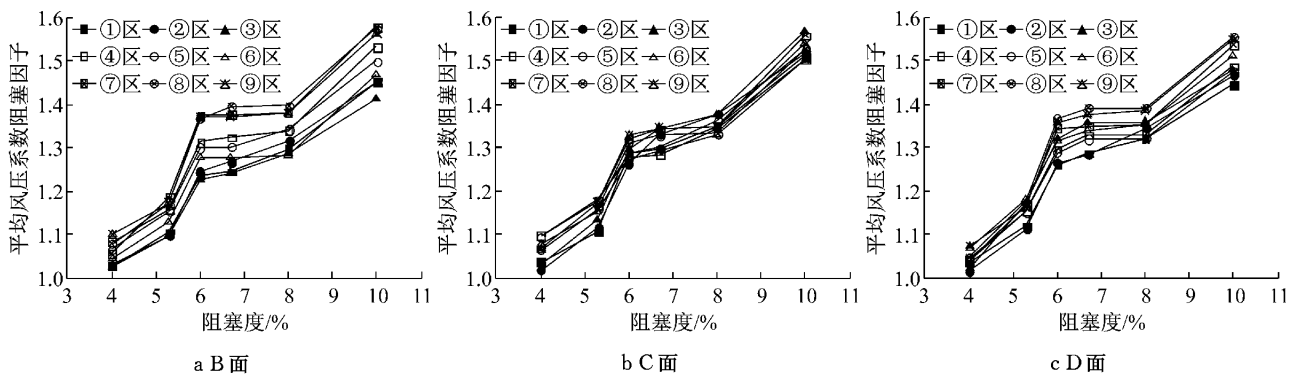


图10 分区平均风压系数阻塞因子(工况2)

Fig.10 Blockage factors of mean pressure coefficients for blocking areas (case 2)

在B面,各区域平均风压系数阻塞因子随阻塞度增加呈增大趋势.当阻塞度为4.0%~6.0%时,各区域阻塞因子增加显著;当阻塞度为6.0%~8.0%时,各区域阻塞因子增加缓慢;当阻塞度为8.0%~10.0%时,各区域阻塞因子增大明显.当阻塞度为4.0%时,各区域阻塞因子均小于1.10;当阻塞度为5.3%时,各区域阻塞因子范围是1.10~1.19;当阻塞度为6.0%时,各区域阻塞因子范围是1.23~1.38;当阻塞度为6.7%时,各区域阻塞因子范围是1.24~1.40;当阻塞度为8.0%时,各区域阻塞因子范围是1.29~1.40;当阻塞度为10.0%时,各区域阻塞因子范围是1.41~1.58.

在D面,各区域平均风压系数阻塞因子与B面的规律相似,数值有所差别.当阻塞度为4.0%时,各

区域的平均风压系数阻塞因子均小于1.10;当阻塞度为5.3%时,各区域阻塞因子范围是1.11~1.18;当阻塞度为6.0%时,各区域阻塞因子范围是1.26~1.37;当阻塞度为6.7%时,各区域阻塞因子范围是1.28~1.39;当阻塞度为8.0%时,各区域阻塞因子范围是1.32~1.39;当阻塞度为10.0%时,各区域阻塞因子范围是1.44~1.55.

在C面,各区域平均风压系数阻塞因子与B,D面的规律相似.当阻塞度为4.0%时,各区域的平均风压系数阻塞因子均小于1.10;当阻塞度为5.3%时,各区域阻塞因子范围是1.11~1.18;当阻塞度为6.0%时,各区域阻塞因子范围是1.26~1.33;当阻塞度为6.7%时,各区域阻塞因子范围是1.29~1.35;当阻塞度为8.0%时,各区域阻塞因子范围是

1.33~1.38;当阻塞度为10.0%时,各区域阻塞因子范围是1.50~1.57。总的来看,B,C和D面各区域平均风压系数阻塞因子的数值差别并不大。

由以上结果可见,周边建筑布置在上游,当阻塞度为6.0%~8.0%时,各区域阻塞因子增幅平缓。在其他阻塞度区间内,各区域阻塞因子增幅较大。可以判断,当阻塞度为6.0%~8.0%时,目标建筑附近的气流增加并不明显。这样的特点与工况1的情况不同,并且变化趋势更加复杂,有关的机理仍需要进一步研究。

图11为工况3目标建筑各面分区平均风压系数阻塞因子随阻塞度的变化规律。由图11可见:

在B面,各区域平均风压系数阻塞因子随阻塞度增加呈增大趋势。当阻塞度为4.0%时,各区域的平均风压系数阻塞因子范围是1.10~1.25;当阻塞度为5.3%时,各区域阻塞因子范围是1.15~1.29;当阻塞度为6.0%时,各区域阻塞因子范围是1.19~1.35;当阻塞度为6.7%时,各区域阻塞因子范围是1.22~1.37;当阻塞度为8.0%时,各区域阻塞因子范围是1.26~1.42;当阻塞度为10.0%时,各区域阻塞因子范围是1.32~1.54。

在D面,各区域平均风压系数阻塞因子与B面的规律相似,数值有所差别。当阻塞度为4.0%时,各区域平均风压系数阻塞因子范围是1.07~1.17;当阻塞度为5.3%时,各区域阻塞因子范围是1.13~

1.25;当阻塞度为6.0%时,各区域阻塞因子范围是1.16~1.26;当阻塞度为6.7%时,各区域阻塞因子范围是1.17~1.26;当阻塞度为8.0%时,各区域阻塞因子范围是1.25~1.31;当阻塞度为10.0%时,各区域阻塞因子范围是1.29~1.34。

在C面,各区域平均风压系数阻塞因子与B,D面的规律相似。当阻塞度为4.0%时,各区域平均风压系数阻塞因子范围是1.10~1.18;当阻塞度为5.3%时,各区域阻塞因子范围是1.13~1.22;当阻塞度为6.0%时,各区域阻塞因子范围是1.16~1.24;当阻塞度为6.7%时,各区域阻塞因子范围是1.19~1.25;当阻塞度为8.0%时,各区域阻塞因子范围是1.24~1.31;当阻塞度为10.0%时,各区域阻塞因子范围是1.28~1.38。总体来看,C面和D面各区域平均风压系数阻塞因子的数值差别并不大;B面各区域的阻塞因子比C面和D面的稍大。

由以上结果可见,虽然周边建筑布置在下游,群体建筑的阻塞效应对模型表面平均风压的影响依然很明显,尤其对B面的阻塞因子影响更大。C面和D面的阻塞因子随阻塞度的变化较为相似。随阻塞度增大,两建筑间形成强烈的“峡谷效应”,致使B面平均风压变化较大。C面和D面的阻塞效应主要来自于目标建筑本身阻塞度的增大。对比工况1,2可知,当周边建筑在目标建筑下游时,目标建筑侧面和背风面平均风压随阻塞度的增幅较为平稳。

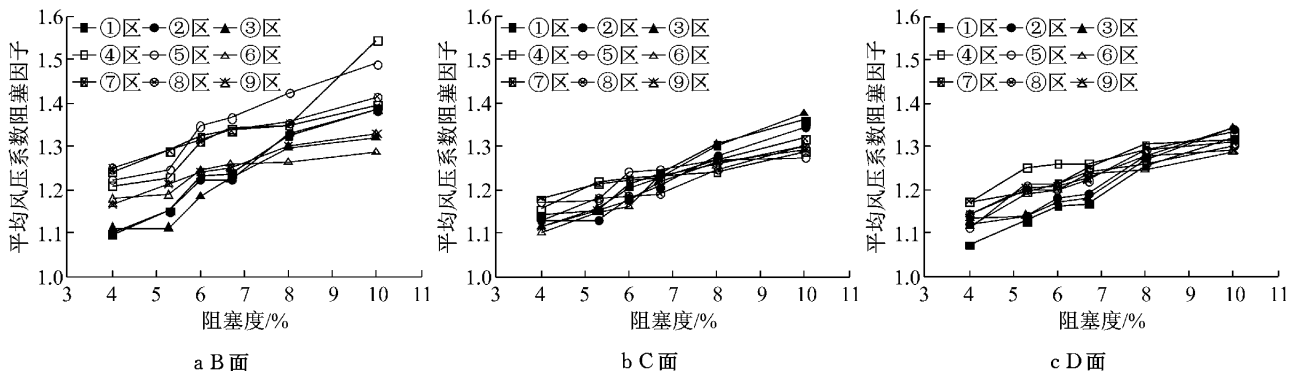


图11 分区平均风压系数阻塞因子(工况3)

Fig. 11 Blockage factors of mean pressure coefficients for blocking areas (case 3)

2.3 各工况阻塞因子对比

为对比不同工况下阻塞因子,图12~14分别列出了B,C和D面⑦,⑧,⑨区平均风压系数阻塞因子随阻塞度的变化规律。由图12~14可见,相同工况下,同一表面各区域的阻塞因子随阻塞度的变化规律相似。这说明对于带有周边建筑的高层建筑,其阻塞效应的判断不能简单由阻塞度的大小来反映,

还取决于周边建筑的布置方式。在相同阻塞度下,周边建筑与目标建筑并列布置(工况1)比周边建筑布置在目标建筑上游(工况2)或下游(工况3)的各表面各区域的平均风压系数阻塞因子小。可能的解释是,当周边建筑并列布置时,负压区各表面平均风压数值就已经很大,阻塞度增大对目标建筑的影响不如当周边建筑布置在上游或下游时明显。当阻塞度

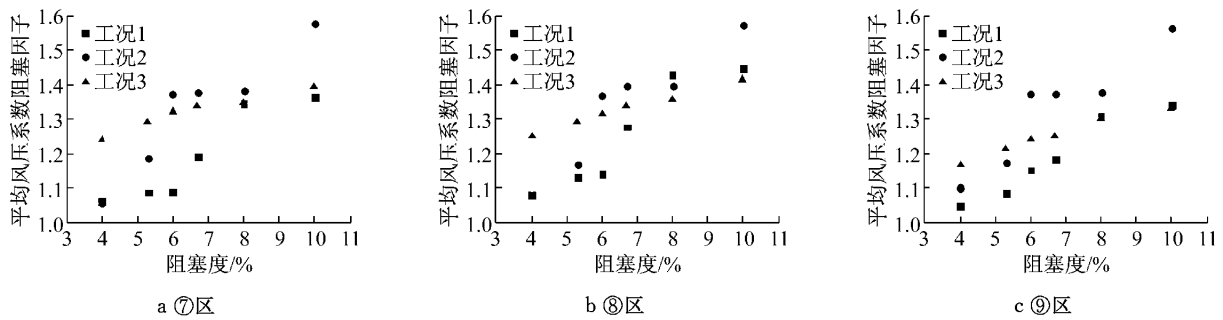


图 12 B 面⑦,⑧,⑨特征区域平均风压系数阻塞因子

Fig. 12 Blockage factors of mean pressure coefficients for areas ⑦, ⑧ and ⑨ in face B

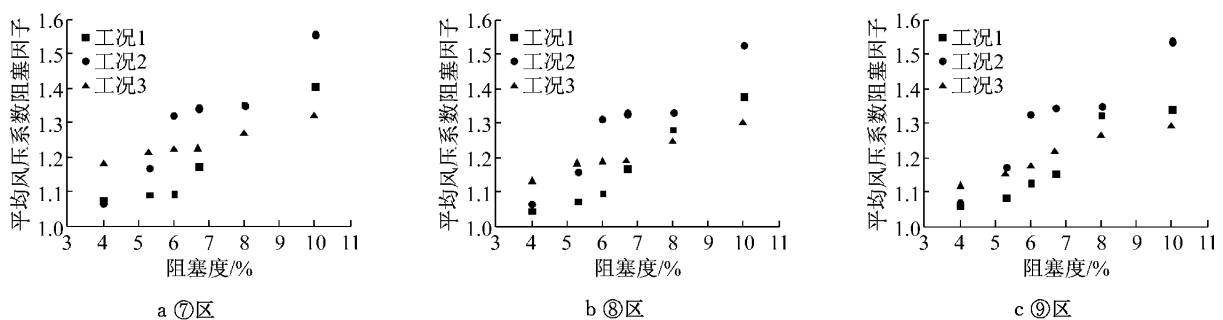


图 13 C 面⑦,⑧,⑨特征区域平均风压系数阻塞因子

Fig. 13 Blockage factors of mean pressure coefficients for areas ⑦, ⑧ and ⑨ in face C

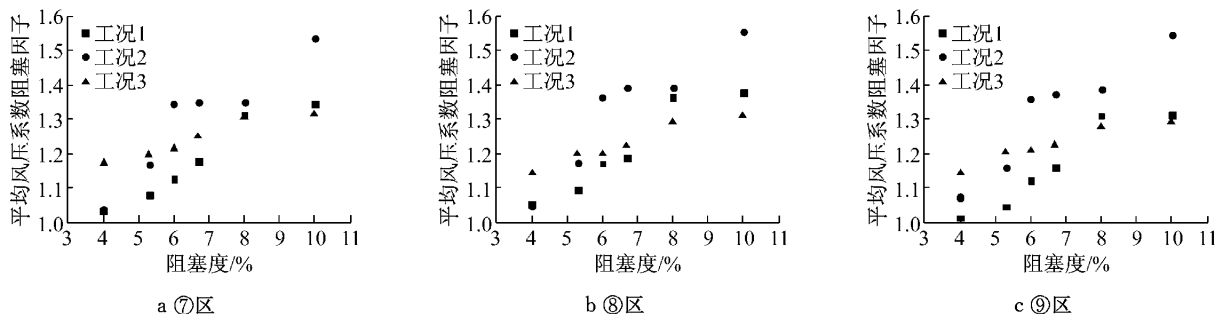


图 14 D 面⑦,⑧,⑨特征区域平均风压系数阻塞因子

Fig. 14 Blockage factors of mean pressure coefficients for areas ⑦, ⑧ and ⑨ in face D

不小于 6.0% 时,工况 2 各区域的阻塞因子较工况 1 或工况 3 的大。

2.4 平均风压系数的阻塞效应修正

对群体建筑表面平均风压系数阻塞效应修正采用与单体建筑相同的公式^[15]

$$\bar{C}_p = \bar{C}_{p0} \frac{1}{(1 - kS/A)^2} \quad (2)$$

式中: \bar{C}_p 为风洞试验获得的模型表面平均风压系数; \bar{C}_{p0} 为没有阻塞效应模型的表面平均风压系数, 为待定参数; k 为阻塞效应调整因子, 为待定参数; S 为群体建筑投影面积; A 为风洞横截面面积。

对不同工况、不同阻塞度的目标建筑 B, C, D 三

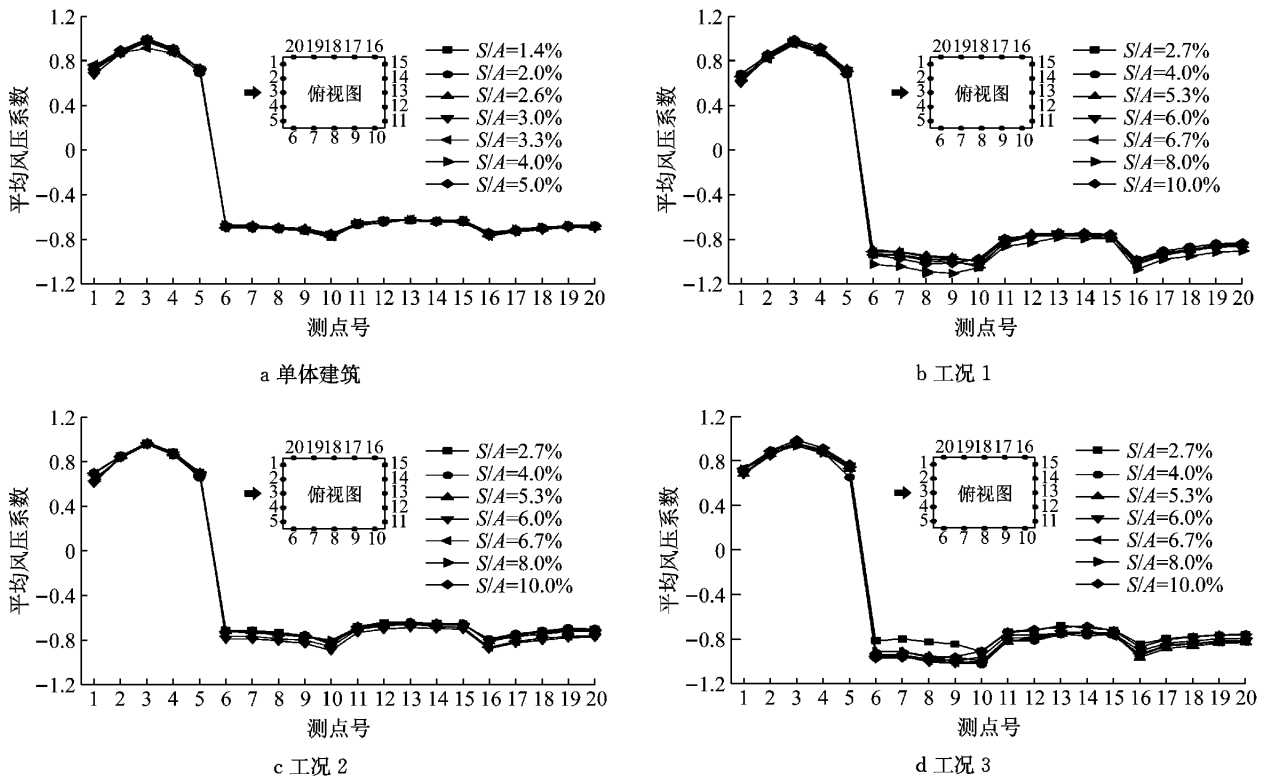
个表面测点的平均风压系数分别进行公式拟合, 得到了 B, C, D 面的阻塞效应调整因子 k , 为方便比较, 仅在表 3 中列出了各个测点拟合结果的平均值。由表 3 可见, 单体建筑的 k 值最大, 而带有周边工况的 k 值都较小, 说明对单体高层建筑风洞试验阻塞度的控制应比带有周边建筑的严格。带有周边建筑的情况下, 工况 2 的阻塞效应因子最大, 平均值为 2.36; 工况 3 的阻塞效应因子最小, 平均值为 1.58。这表明, 当周边建筑的体量与目标建筑相当时, 阻塞效应的程度会随周边建筑布置方案而变化。

利用公式(2)和表 3 中数据对目标建筑 0.6H 高度处的侧面和背风面测点平均风压系数进行修

表3 拟合参数 k 的平均值Tab.3 Mean value of fitting parameter k

位置	k 的平均值			
	单体建筑	工况 1	工况 2	工况 3
B 面	2.44	2.04	2.35	1.73
C 面	2.46	1.88	2.38	1.48
D 面	2.45	1.88	2.36	1.54
均值	2.45	1.93	2.36	1.58

正. 将单体建筑和工况 1~3 的修正结果示于图 15

图 15 $0.6H$ 高度处平均风压系数修正结果Fig.15 Correction of mean pressure coefficients on $0.6H$ of target building

3 结论

本文在均匀来流中对带有周边的方柱形高层建筑的阻塞效应进行风洞试验研究,主要分析了3种双柱布置工况下目标建筑表面平均风压系数的阻塞效应,得到以下结论:

(1) 目标建筑迎风面平均风压系数受阻塞效应的影响较小,影响幅度不足10%,可忽略其作用;侧面和背风面平均风压系数均随阻塞度的增加不同程度增大,且阻塞效应明显。

(2) 当按照投影面积计算风洞试验阻塞度时,阻塞效应的程度与周边建筑与目标建筑的相对位置有关:当周边建筑在目标建筑下游位置时,阻塞因子的增大较为平缓;当周边建筑与目标建筑并列布置

中. 由图15可见,对于工况1~3,虽然在个别阻塞度下修正结果有一定差别,但总体来看,修正效果仍较为理想. 对于单体建筑,不同阻塞度的修正结果吻合度很高. 与单体高层建筑不同,带有周边建筑的高层建筑阻塞效应在不同位置是变化的,变化规律更加复杂,用拟合参数 k 的平均值来修正所有测点的平均风压系数会产生一定误差。

或布置在目标建筑上游位置时,阻塞因子的增幅较明显。

(3) 当周边建筑与目标建筑并列布置时,侧面和背风面平均风压系数阻塞因子随阻塞度的增大并不均匀. 当阻塞度为5.3%时,阻塞因子最大为1.13;当阻塞度为10.0%时,阻塞因子最大为1.45。

(4) 当周边建筑在目标建筑侧前方的上游布置时,在整个阻塞度的变化范围内,阻塞因子增幅相近. 当阻塞度为5.3%时,阻塞因子最大为1.19;当阻塞度为10.0%时,阻塞因子最大为1.58。

(5) 当周边建筑在目标建筑侧前方的下游布置时,侧面和背风面平均风压系数阻塞因子随阻塞度的增大较为均匀. 当阻塞度为5.3%时,阻塞因子最大为1.29;当阻塞度为10.0%时,阻塞因子最大为1.54。

(6) 对周边建筑侧面和背风面平均风压系数进行了阻塞效应修正,拟合了阻塞效应影响因子. 带有周边建筑时,阻塞效应影响因子比单体建筑的情况小.

应当指出的是,带有周边建筑的高层建筑的阻塞效应比单体建筑的复杂得多,其阻塞效应取决于周边建筑尺寸和周边建筑的布置方式. 本文给出的阻塞效应规律具有一定的代表性,但距实际应用仍有一定的差距,需要更深入的研究以揭示阻塞效应的本质.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Raju K G R, Singh V. Blockage effects on drag of sharp-edged bodies[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1975, 1(3): 301.
- [3] 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.
- [4] Laneville A, Trepanier J Y. Blockage effects in smooth and turbulent flows; the case of two-dimensional rectangular cylinders[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1986, 22(2-3): 169.
- [5] Laneville A. Turbulence and blockage effects on two dimensional rectangular cylinders [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33(1-2): 11.
- [6] Parkinson G V, Hameury M. Performance of the tolerant tunnel for bluff body testing[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33(1-2): 35.
- [7] Parkinson G V, Cook N J. Blockage tolerance of a boundary-layer wind tunnel [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 42(1-3): 873.
- [8] Parkinson G V, Kong L, Cook N J. Configuration criteria for a blockage-tolerant wind tunnel[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 40(2): 215.
- [9] Takeda K, Kato M. Wind tunnel blockage effects on drag coefficient and wind-induced vibration [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 42(1-3): 897.
- [10] Utsunomiya H, Nagao F, Ueno Y, *et al.* Basic study of blockage effects on bluff bodies [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 49(1-3): 247.
- [11] 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.
- [12] Amrouche N, Dizene R, Laneville A. Observations of the wind tunnel blockage effects on the mean pressure distributions around rectangular prisms in smooth and grid turbulent flows [C]// *Revue des Energies Renouvelables SMEE' 10*. Bou Ismail Tipaza;[s.n.], 2010: 21-26.
- [13] 王磊,梁枢果,邹良浩,等. 阻塞效应对高层建筑风洞试验的影响分析[J]. *实验力学*, 2013, 28(2): 261.
WANG Lei, LIANG Shuguo, ZOU Lianghao, *et al.* Investigation on blockage effect of high-rise building in wind tunnel experiment[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(2): 261.
- [14] 周晖毅,顾明. 单通道测压管路系统的优化设计[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2003, 31(7): 798.
ZHOU Xuanyi, GU Ming. Optimization of dynamic pressure measurement of single-channel tubing systems[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2003, 31(7): 798.
- [15] 黄剑,顾明. 均匀风场中高层建筑平均风力的阻塞效应[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2014, 42(6): 853.
HUANG Jian, GU Ming. Experimental investigation of blockage effects on mean wind forces on tall buildings in uniform flow [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2014, 42(6): 853.