

# 周边建筑对低矮建筑平屋盖上风压的干扰效应

全涌<sup>1</sup>, 顾明<sup>1</sup>, 田村幸雄<sup>2</sup>, 黄鹏<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 东京工艺大学, 厚木市 243-0297)

**摘要:** 通过刚性模型测压风洞试验对被同类周边建筑所包围的低矮建筑表面风压系数进行了测量, 分析了周边建筑的建筑面积密度对目标建筑平屋盖风压系数分布状态的影响规律. 试验结果表明: 当低矮建筑被同外形、同高度的周边建筑包围时, 随着周边建筑面积密度的增大, 被包围建筑屋盖上斜风导致的锥形涡将逐渐消失, 屋盖上不同部位的负风压极值将逐渐减小并趋于均一; 当周边建筑面积密度分别为 0.1, 0.3 和 0.6 时, 被包围建筑屋盖上的最大负风压可分别减小为孤立建筑的 80%, 30% 和 20%.

**关键词:** 低矮建筑; 风洞试验; 风荷载; 气动干扰  
**中图分类号:** TU 312.1 **文献标识码:** A

## Aerodynamic Interference of Wind Loads on Roofs of Low-rise Buildings

QUAN Yong<sup>1</sup>, GU Ming<sup>1</sup>, Tamura Yukio<sup>2</sup>, HUANG Peng<sup>1</sup>  
(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tokyo Polytechnic University, Atsugi 243-0297, Japan)

**Abstract:** According to a series of wind pressure measurement wind tunnel tests, the effects of area densities of surrounding buildings on distributions of wind loads on a flat-roof building are studied. The test results indicate that when the area densities of the surrounding buildings increase, the conical vortices on the flat roof of the surrounded building for oblique wind directions will disappear gradually and the extreme values of suction pressures on different locations of the flat roof will decrease and become uniform. The maximum values of negative wind pressure on the flat roof of the surrounded building become 80%, 30% and 20% of those of isolated buildings when it is surrounded by the buildings with the same geometric parameters but with different area densities of 0.1, 0.3 and 0.6, respectively.

**Key words:** low-rise building; wind tunnel test; wind load;

aerodynamic interference

低矮建筑通常都是成群出现的, 周边建筑对被包围建筑的风荷载存在气动干扰效应. 尽管有很多研究者研究了高层建筑之间的气动干扰效应, 但研究周边低矮建筑对被包围低矮建筑风荷载的影响的文章却不多见<sup>[1-4]</sup>, 各国的建筑结构荷载规范也没有相应的规定. Ho 等<sup>[1]</sup>基于一个低矮建筑街区的风洞试验数据, 从概率统计的角度推荐了一种分析周边障碍物对被包围低矮建筑风荷载影响的方法. 其周边障碍物可以是随机出现的低矮建筑、树木、围墙或停车场等. 在他的风洞试验中, 周边建筑环境工况只有一个, 没有研究周边建筑环境参数的变化. Jozwiak 等<sup>[2]</sup>对一栋多层建筑附近的风速受周边建筑的影响进行了风洞试验研究, 其主要考查目标是建筑通风方面的问题. Jia 等<sup>[3-4]</sup>将低矮建筑看作粗糙元, 给出了均匀分布的立方体形状的低矮建筑群中建筑的间隔距离对边界层风速的影响以及对作用在建筑上的风压分布的影响. Liu<sup>[4]</sup>以建筑的平均迎风面积与平均占地面积之比为建筑密度的参数, 通过风洞试验研究了该参数大小对低矮建筑的复杂屋盖上角点、屋檐和内部 3 种区域的峰值风压系数的影响规律.

本课题基于刚性模型表面测压风洞试验, 研究不同周边建筑对低矮建筑风荷载的影响规律. 本文介绍风洞试验及数据处理方法, 并讨论了周边建筑的面积密度对被包围建筑平屋盖上风压分布的影响.

## 1 风洞试验概况

本文的压力测量风洞试验在日本东京工艺大学

收稿日期: 2008-09-17  
基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ06B05, 2008BAJ08B14); 国家自然科学基金创新研究群体基金资助项目(50621062); 国家自然科学基金面上项目(50708082); 教育部留学回国人员科研启动基金和同济大学“985 工程”二期建设项目联合资助  
作者简介: 全涌(1971—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为结构抗风. E-mail: quanyong@tongji.edu.cn

的大气边界层风洞中进行.该风洞试验段宽 2.2 m, 高 1.8 m. 空风洞最大试验风速  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 考虑到阻塞率及试验风速等因素的需要, 本试验长度比尺、风速比尺和时间比尺分别取  $1:100$ ,  $1:3$  和  $3:100$ . 被考查的目标建筑假定处在日本规范(AIJ)<sup>[5]</sup>给定的城市郊区风场, 其平均风速剖面指数为 0.20, 10 m 高度处的来流紊流强度为 25% 左右. 本课题实验中, 利用尖塔、粗糙元及地毯在风洞中模拟得到所需风场, 其平均风速剖面及湍流度剖面如图 1 所示. 图中:  $V$  为来流风速,  $V_{\text{ref}}$  为一选定参考高度处的平均风速,  $I$  为湍流强度,  $z$  为高度. 试验中 10 cm 高度处的试验风速为  $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 对应的实际 10 m 高度处基本风速为  $22.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

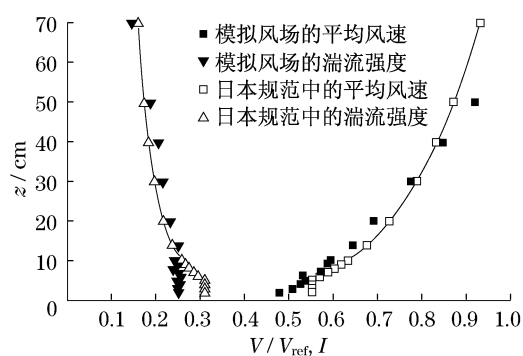


图1 风场模拟结果

Fig.1 Parameters of the simulated wind field

图 2 显示典型的低矮建筑环境. 目标低矮建筑外形高度分别为 6, 12 和 18 m, 宽度为 16 m, 长 24 m 的居住建筑. 模型布置图见图 3, 其中  $C_A$  为建筑面积密度. 周边建筑的宽度和长度与目标建筑相同, 但高度不一定相同. 周边建筑与目标建筑形成的建筑区的建筑面积密度  $C_A$  在 0.1~0.6 范围内变化, 其布置情况如图 4 所示. 这里的建筑面积密度  $C_A$  定义为建筑的占地面积与建筑的场地面积之比, 即

$$C_A = \frac{bd}{BD} \quad (1)$$

式中:  $b$  和  $d$  分别为建筑的宽度和长度;  $B$  和  $D$  为此区域建筑的平均间距. 周边建筑的考查范围为直径 200 m 的圆形区域. 建筑的排列方式有 3 种: 矩阵排列、交错排列和随机排列.

风洞试验中对 60 个有干扰模型工况(如表 1 所示)和 3 个无干扰模型工况进行了刚性模型表面风压测量. 这些工况包括 3 种目标建筑高度、3 种周边建筑高度、8 种建筑面积密度和 3 种周边建筑的排列

方式, 每个工况都在  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67.5^\circ$  和  $90^\circ$  共 5 个风向角下进行了试验.



图2 典型的低矮建筑环境

Fig.2 Typical environment of low buildings

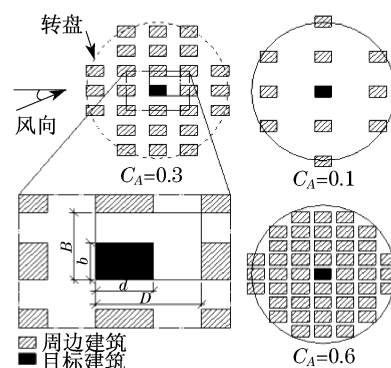


图3 目标建筑模型布置图

Fig.3 Layout of target model

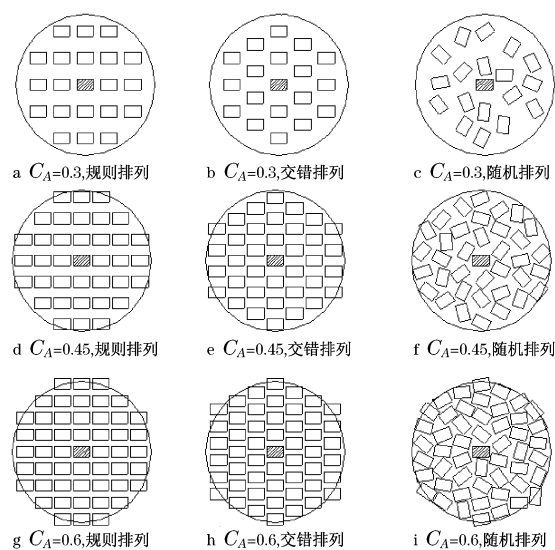


图4 周边建筑布置示意图

Fig.4 Layout of surrounding model

压力测量风洞试验对目标建筑模型的屋盖及墙面上均匀布置的 328 个测点进行了采样. 采样频率为 781.25 Hz, 样本长度 18 s, 对应实际采样频率为 23.4 Hz 和采样时间 10 min. 每一试验工况采样 10 次.

表 1 试验工况  
Tab.1 Test cases

编号	周边建筑高度/cm	目标建筑高度/cm	建筑面积密度	排列
01—09	6,12,18	6,12,18	0.1	规则
10—18	6,12,18	6,12,18	0.3	规则
19—27	6,12,18	6,12,18	0.6	规则
28—32	12	12	0.15,0.2,0.25,0.4,0.5	规则
33—35	6	6	0.15,0.30,0.50	交错
36—43	12	12	0.1,0.15,0.2,0.25,0.3,0.4,0.5,0.6	交错
44—46	18	18	0.15,0.30,0.50	交错
47—49	6	6	0.1,0.3,0.6	随机
50—57	12	12	0.1,0.15,0.2,0.25,0.3,0.4,0.5,0.6	随机
58—60	18	18	0.1,0.3,0.6	随机

## 2 试验数据处理方法

采样得到的电压信号通过压力传感器系统标定、管道频响函数修正及量纲一化处理后得到测点上的风压系数时程序列  $C_p(m, n, \theta, t_i)$ 。其中： $m$  为样本序号 1, 2, ..., 10； $n$  为测点序号 1, 2, ..., 328； $\theta$  为风向角  $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ ； $t_i$  为时间点。压力测量管道的频响函数如图 5 所示。量纲一化处理以平均屋盖高度处的来流风压为参考风压。

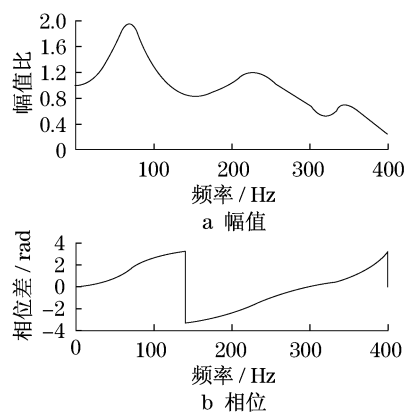


图 5 测压管道的频响函数

Fig.5 Frequency response function of pressure taps

由于作用在结构上的风压是时空变化的，它在空间上的脉动是不同步的，因此结构所受风力脉动将受到风压作用面积的影响。为了使给出的局部压力系数对应于一定的围护结构尺寸，本文对测点上的风压时程以 TVL(Lawson T V)法<sup>[6]</sup>进行处理。其基本思想是用测点风压的时间平均替代结构风压的空间平均，计算公式如下：

$$TV = kL \quad (2)$$

式中： $T$  为等效时间平均时距； $V$  为来流风速； $L$  为

受风结构的特征长度，它是矩形结构的对角线长度或圆形结构的直径长度； $k$  为经验常数，Lawson 给出的推荐值为 4.5。

本文对测点风压系数时程  $C_p(m, n, \theta, t_i)$  进行了 0.2 s 移动平均，得到对应于围护结构特征长度为 1 m 的局部风压系数的时程序列  $C_{p1}(m, n, \theta, t_i)$ 。基于上述方法得到的局部风压系数时程序列  $C_{p1}(m, n, \theta, t_i)$  的 10 个样本，局部风压系数的平均值  $\bar{C}_p(n, \theta)$  及均方根值  $\tilde{C}_p(n, \theta)$  分别由 10 个样本的 10 个平均值和 10 个均方根值平均得到

$$\bar{C}_p(n, \theta) = \frac{1}{10} \sum_{m=1}^{10} \bar{C}_{p1}(m, n, \theta) \quad (3)$$

$$\tilde{C}_p(n, \theta) = \frac{1}{10} \sum_{m=1}^{10} \tilde{C}_{p1}(m, n, \theta) \quad (4)$$

最大局部吸力系数  $\hat{C}_p(n, \theta)$  的计算比较复杂。由于风荷载具有随机性，单个样本的最大或最小值并不具备代表性。Cook 等<sup>[7]</sup>基于极值 I 型分布假定，给出了如下极值计算方法：

$$\hat{C}_p(n, \theta) = U_{\hat{C}_p}(n, \theta) + 1.4/a_{\hat{C}_p}(n, \theta) \quad (5)$$

式中： $U_{\hat{C}_p}$  和  $1/a_{\hat{C}_p}$  分别为风压极值 I 型分布的模和散度参数。这 2 个参数可以用如下 BLUE 方法<sup>[8]</sup>计算

$$U_{\hat{C}_p} = \sum_{i=1}^N a_i X_i, \quad 1/a_{\hat{C}_p} = \sum_{i=1}^L b_i X_i \quad (6)$$

这里， $X_i$  是 10 个样本最大值按降序排列时的第  $i$  个值，参数  $a_i$  和  $b_i$  均为拟合参数，当样本数量为  $L = 10$  时， $a_i$  和  $b_i$  的值由表 2 给出。

文献<sup>[7]</sup>方法是在综合考虑了风速极值的概率分布和风压系数极值的概率分布对风荷载极值影响的基础上提出的，它能够反映结构风荷载极值的实际情况。本文将基于该方法给出风压系数的最大最小值。

表 2 BLUE 方法的系数表(样本数量为 10)  
Tab.2 Coefficients of BLUE method(for 10 samples)

拟合参数	样本数量									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$a_i$	0.220	0.160	0.130	0.110	0.096	0.081	0.067	0.054	0.042	0.029
$b_i$	-0.350	-0.091	-0.019	0.022	0.049	0.066	0.077	0.083	0.084	0.078

3 试验结果

考虑到 45°风向角时建筑屋盖上最大吸力风压系数最具代表性,45°风向角时屋盖上锥形涡最显著,因此,先讨论风向角为 45°时屋盖风压分布情况,然后再讨论任意风向角下最大负风压系数的分布情况。

图 6—8 给出了周边建筑和被包围建筑同高(12 m)、风向角为 45°时,不同周边建筑面积密度下被包围建筑平屋盖上的局部风压系数的平均值、均方根值和最大负压系数值。

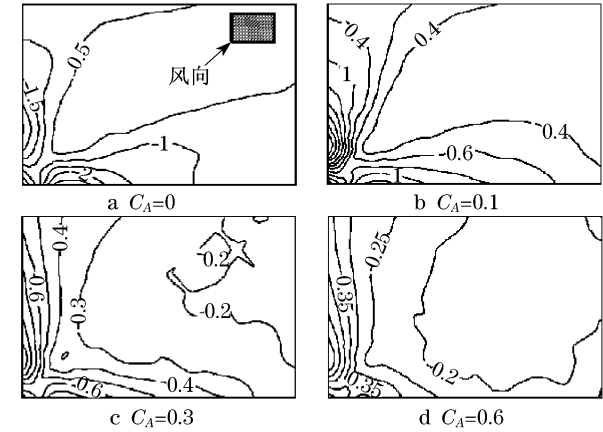


图 6 平均风压系数(风向角为 45°)  
Fig.6 Mean wind pressure coefficients  
(wind direction of 45°)

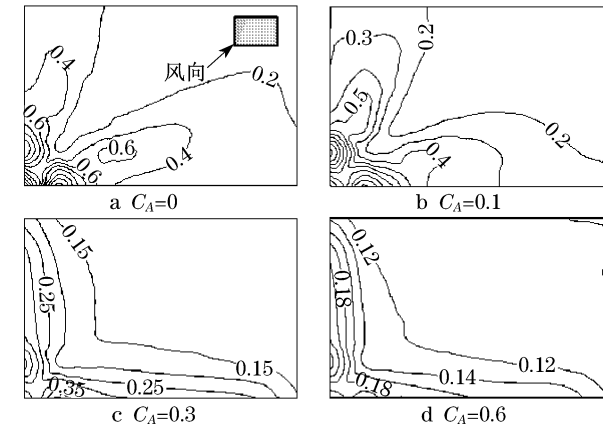


图 7 风压系数均方根值(风向角为 45°)  
Fig.7 RMS wind pressure coefficients  
(wind direction of 45°)

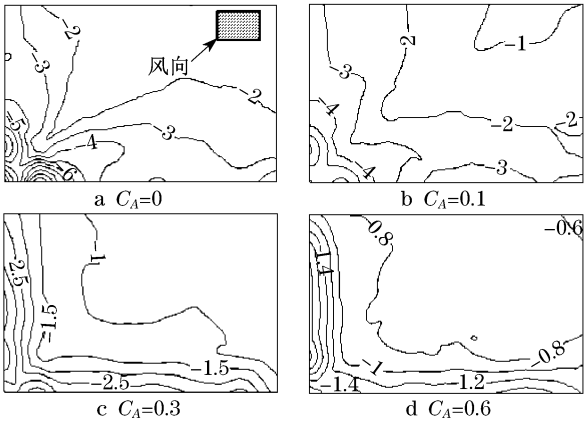


图 8 最大负风压系数(风向角为 45°)  
Fig.8 Minimum wind pressure coefficients  
(wind direction of 45°)

从图 6 中可以看出,孤立建筑(建筑面积密度看作零)整个房盖的平均风压均表现为负值(即吸力),在 -2.5~-0.5 范围内变化.最大平均吸力系数值出现在迎风屋檐附近,为 -2.5 左右.平均吸力系数沿风向方向逐渐减小,最后减小到 -0.5.当周边建筑的建筑面积密度逐渐增大时,屋盖上的平均吸力系数逐渐变小,变化范围也逐渐缩小.当建筑面积密度达到 0.6 时,吸力系数变化范围缩小到 -0.6~-0.2.从图 6 中可以看出,当建筑面积密度为 0 和 0.1 时,平均风压系数图中在迎风屋檐附近可以看到锥形涡的痕迹,但在建筑面积密度为 0.3 和 0.6 时却看不到.随着周边建筑密度的增大,平均风速将减小,紊流强度将增大.增大的紊流强度将破坏屋檐上方旋涡脱落的规律性,从而导致规律性旋涡脱落形成的锥形涡的消失。

图 7 中,孤立建筑的风压系数均方根值的最大值高达 1.0,发生在离迎风角点  $B/10$  左右的迎风屋檐附近,且该处的脉动风压变化剧烈,表明这里有强烈的旋涡产生.风压系数均方根值随周边建筑的面积密度的增大而减小,在建筑面积密度为 0.6 时屋盖上的风压系数均方根值的最大值减小到 0.22.这表明,尽管周边建筑的出现使得流场的紊流强度增大,但平均风速的锐减还是使脉动风压大大减小,从

而使得屋盖上的风压系数均方根值大大减小。

图 8 给出了最大负风压系数。对于孤立建筑,此系数在  $-10 \sim -2$  之间变化,最大值发生在离迎风角点  $B/10$  左右的迎风屋檐附近。随着周围建筑面积密度的增大,最大负风压系数逐渐减小,变化范围也逐渐缩小。当建筑面积密度增大到 0.6,最大负风压系数的变化范围变成  $-2.0 \sim -0.8$ 。

图 9 给出了任意风向角下屋盖上最大负风压系数,它是围护结构设计风压的计算依据。当没有周边建筑时,屋盖上的最大负风压系数最大值达到  $-10$ ,发生在离角点  $D/10$  左右的长边屋檐附近。整个屋盖上最大负风压系数分布严重不均匀,呈现周边大、中部小的分布,中部最小值为  $-4$  左右。当周边建筑面积密度为 0.1 时,屋盖上的最大负风压系数最大值减小到  $-8$ ,发生在离角点  $D/10$  左右的短边屋檐附近。整个屋盖上最大负风压系数分布仍然很不均匀,呈现周边大、中部小的分布,中部最小值减小为  $-2$  左右。当周边建筑面积密度为 0.3 时,屋盖上的最大负风压系数最大值减小到  $-3$ ,发生在角点附近。整个屋盖上最大负风压系数分布不均匀的情况大大改变,中部最小值仍然为  $-2$  左右。当周边建筑面积密度增大到 0.6 时,屋盖上的最大负风压系数最大值减小到  $-1.5$ ,发生在短边屋檐附近。整个屋盖上最大负风压系数分布变得非常均匀,中部最小值也在  $-1$  左右。如果以屋盖最大负风压系数的最大值作为整个屋盖围护结构的设计风压,那么,被面积密度分别为 0.1, 0.3 和 0.6 的周边建筑包围的低矮建筑的围护结构设计风荷载仅仅是孤立建筑围护结构风荷载的 80%, 30% 和 20% 左右。

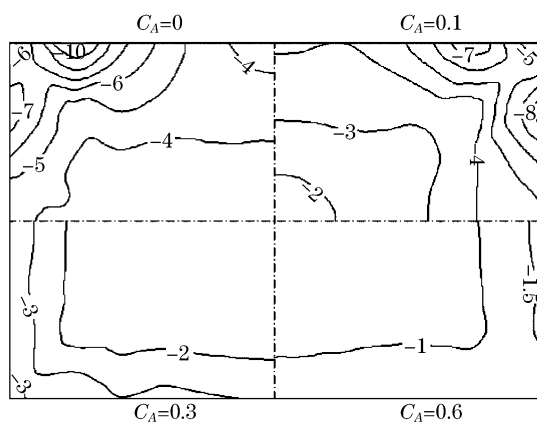


图 9 最大负风压系数(任意风向角)

Fig.9 Minimum wind pressure coefficients  
(any wind direction)

## 4 结论

通过一系列表面压力测量风洞试验,研究了周边建筑的面积密度及相对高度对被包围的低矮建筑平屋盖上的风压分布的影响。试验结果表明:

(1) 随着周边建筑的建筑面积密度的增大,斜风作用下低矮建筑平屋盖上的锥形涡将逐渐消逝,屋盖上的平均风压逐渐减小并趋于均一。

(2) 不论是平均风压、脉动风压还是最大负风压,都因周边建筑群的建筑面积密度的增大而减小。

(3) 任意风向条件下,随着周边建筑的面积密度的逐渐增大,被包围建筑屋盖上最大负风压系数将逐渐减小,且分布逐渐趋于均一。当周边建筑面积密度分别为 0.1, 0.3 和 0.6 时,被包围建筑屋盖上的围护结构风荷载分别减小为孤立建筑的 80%, 30% 和 20% 左右。

**致谢** 本课题风洞试验是作者在日本留学期间在东京工艺大学的大气边界层风洞中完成的,得到日本文部科学省的 GCOE 研究计划的资助,在此表示衷心的感谢!

## 参考文献:

- [1] Ho T C E, Surry D, Davenport A G. Variability of low building wind loads due to surrounding obstructions[J]. J of Wind Eng and Ind Aerody, 1990, 136(2/3): 297.
- [2] Jozwiak R, Kacprzyk J, Zuranski J A. Wind tunnel investigations of interference effects on pressure distribution on a building[J]. J of Wind Eng and Ind Aerody, 1995, 57(2/3): 159.
- [3] Jia Y. The effects of roughness element spacing on boundary layer velocity profile and pressure distributions on a cube[D]. Clemson: Clemson University. Department of Civil Engineering, 1997.
- [4] Liu Z. Field measurements and wind tunnel simulation of hurricane wind loads on single family dwellings[D]. Clemson: Clemson University. Department of Civil and Coastal Engineering, 2006.
- [5] Architectural Institute of Japan (AIJ). C30526200E Recommendations for loads on buildings[S]. Tokyo: Japan Academic Association for Copyright Clearance Inc (JAACC), 2004.
- [6] Lawson T V. Wind effects on buildings, volume 1: design application[M]. London: Applied Science Publishers, 1980.
- [7] Cook N J, Mayne J R. A refined working approach to the assessment of wind loads for equivalent static design[J]. J of Wind Eng & Ind Aerody, 1980, 6(1/2): 125.
- [8] Lieblein J. Efficient methods of extreme-value methodology[R]. New York: Natl Bur Stand (U S) Rep (NBSIR), 1974.