

文章编号: 1000-4750(2015)10-0169-08

基于超越阈值概率的城市综合体 行人高度风环境试验研究

陈伏彬^{1,2}, 李秋胜^{2,3}, 吴立⁴

(1. 长沙理工大学土木与建筑学院, 长沙 410114; 2. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 长沙 410082;
3. 香港城市大学建筑学及土木工程学系, 香港 999077; 4. 珠海十字门中央商务区建设控股有限公司, 珠海 519000)

摘 要: 该文以某城市综合体为研究对象, 在风洞中开展了大尺度建筑和密集建筑群对行人高度风环境影响的试验研究。基于阵风等效平均风速与项目区域的气候条件, 给出了采用基于超越阈值概率的 4 种评价标准的评估结果。结果表明: 对于坐, Force Technology-DMI 标准最为严格; 对于站, Isyumov and Davenport 标准最为严格; 对于行走, Michael J Soligo 标准最为严格; 针对不同的人类活动, UWO 标准最为宽松。

关键词: 城市综合体; 行人高度风环境; 超越概率; 风洞试验; 威布尔分布

中图分类号: TU119 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.09.0751

STUDY ON PEDESTRIAN LEVEL WIND ENVIRONMENT OF HOPSCA USING THRESHOLD-OF-PROBABILITY-OF-EXCEEDANCE

CHEN Fu-bin^{1,2}, LI Qiu-sheng^{2,3}, WU Li⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Department of Architecture and Civil Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;
4. Zhuhai Shizhimen Central Business District Development Holdings Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

Abstract: Wind tunnel tests of pedestrian level wind environments influenced by large scale construction and dense buildings for a HOPSCA (Hotel, Office, Parking, Convention, Apartment) development were conducted. Estimations of the wind environment using four different criteria are presented and discussed based on the GEM and local climate information. The results indicate that Force Technology-DMI criterion is the most rigorous for sitting individuals, the Isyumov and Davenport criterion for standing individuals, and Michael J. Soligo criterion for walking individuals. Furthermore, the UWO criterion is the most undemanding for all human activities.

Key words: HOPSCA; pedestrian level wind environment; exceedance probability; wind tunnel test; Weibull distribution

随着社会和经济的发展, 城市的土地资源日益紧缺, 城市的发展逐步向集约化、复合化方向发展, 形成了酒店(hotel)、写字楼(office)、生态公园(parking)、会议会展(convention)、高尚公寓

(apartment)等多种都市功能集合在一起的城市综合体(HOPSCA)^[1], 这也是建筑综合体向城市空间巨型化、城市价值复合化、城市功能集约化的结果, 成为城市功能混合使用中心, 延展了城市的空间价

收稿日期: 2014-09-04; 修改日期: 2015-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408062, 91215302, 51178179); 湖南省创新平台与人才计划项目(2015RS4050); 中国博士后基金项目(2015M572238); 湖南省教育厅一般项目(15C0054)

通讯作者: 李秋胜(1962—), 男, 湖南人, 教授, 博士, 博导, 主要从事建筑结构抗风研究(E-mail: bcqsl@cityu.edu.hk).

作者简介: 陈伏彬(1981—), 男, 福建人, 讲师, 博士, 硕导, 主要从事建筑结构抗风研究(E-mail: fbchen88@126.com);

吴立(1978—), 男, 广东人, 高工, 硕士, 主要从事结构设计工作(E-mail: billywu@126.com).

值。从另一方面而言,伴随城市建筑的不断增多,建筑物造成气流下冲、缩流、渠化、旋涡、穿堂风等现象,使得在建筑物的周围引起局部风速的增大与紊乱,产生不良的风环境,影响到行人的舒适甚至危及行人安全。种种问题势必给建设中的“高大上”的城市综合体提出新的挑战:如何解决建筑群带来的风环境问题?

风环境研究国外开始较早,1972年 Davenport^[2]提出了以人舒适度为准则的评估标准;近年来,欧洲多个研究机构提出了多个行人风环境评估标准^[3-4],针对这些标准间的差异进行分析对比^[5-7],认为等效阈值风速及对应的超越概率是评估行人风环境的关键参数^[6-7]。

风绕建筑物的流动非常复杂,包含了湍流、分离流、三维流动等,空气动力学在理论上还难以完全解释,目前主要通过风洞试验^[8-9]或数值模拟^[5,10-11]完成相关的研究工作。本文以珠海十字门中央商务区会展商务组团一期(包括标志性塔楼、展览中心、五星级酒店、公寓式酒店、绸带等,如图1所示)为工程背景,详细研究基于超越阈值概率的不同评价标准下的大型城市综合体行人风环境问题。



图1 项目效果图
Fig.1 View of project

1 风洞试验介绍

1.1 风场条件

试验在湖南大学大气边界层风洞的高速试验段进行。该风洞为闭口回流式矩形截面风洞,整个回流系统水平布置,包括两个试验段:高速段和低速段,其中高速试验段的尺寸为3 m宽、2.5 m高、17 m长;低速试验段尺寸为5.5 m宽、4.4 m高、15 m长。

在试验之前,首先以二元尖塔、挡板及粗糙元以及挡板分别模拟台风风场和《建筑结构荷载规范》^[12]规定的B类地貌风场。风场的平均风速剖面及湍流度剖面如图2。

风洞模型试验中包括周边直径900 m范围内的

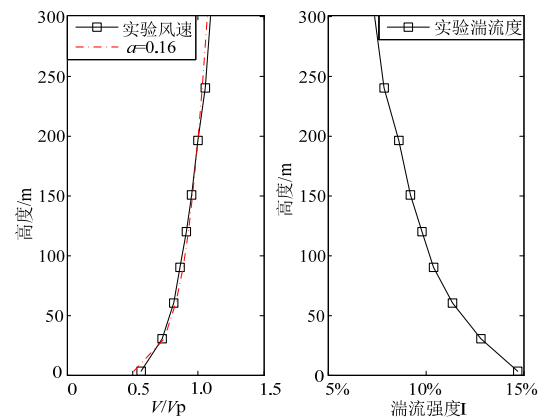
已建和待建主要建筑物,模型与实物在外形上保持几何相似,缩尺比为1:300,如图3所示。风洞试验时,每一个风向测量一组数据。风向角间隔为10°,以垂直展览中心长边方向的来流定义为0°风向,逆时针旋转,总共有36个风向,如图4所示。

在整个区域上布置了26个风速测点(如图5),用以测试在36个不同风向下足尺高度2 m处的平均风速和阵风风速。从而获得测点的平均风速比、阵风风速比以及阵风等效风速比,计算时参考点定为10 m高度。

在风洞试验中,行人高度风的测量采用行人高度风测量探头(图6)。探头为圆柱形,柱的上端面与地面平齐,中间有测压孔,从测压孔中心伸出一根细的探针测顶部压力 p_A ,侧向导出一根探针测静压 p_B 。则距离底面标高 h 处的风速 U_h 可以表示为:

$$U_h = a + b\sqrt{p_A - p_B} \quad (1)$$

式中,参数 a 、 b 为探头的标定系数。这种探头对流场干扰很小,没有方向性,可测量各个方向的风速。行人高度实际取为2 m,对应模型为0.67 cm。



(a) 平均风剖面 (b) 湍流度剖面

图2 B类风场参数

Fig.2 Profiles of wind field at terrain B



图3 风洞试验模型图

Fig.3 Wind tunnel models

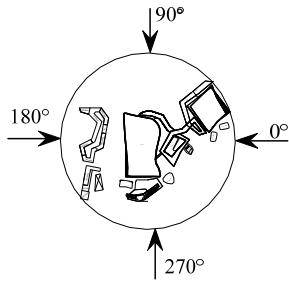


图4 风向角定义

Fig.4 Definition of wind direction

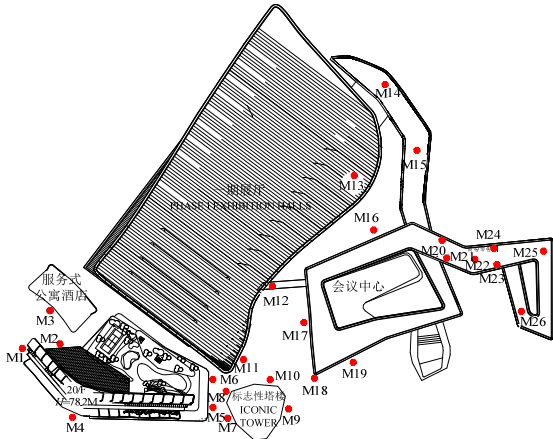


图5 行人高度风速测点布置

Fig.5 Layout of pedestrian level wind speed taps

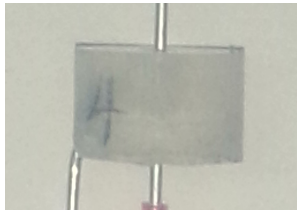


图6 行人高度风测量探头

Fig.6 Sketch of the probe

2 行人风环境评价指标及方法

国外许多学者或研究结构对行人风环境的标准开展了大量的研究，并提出了不同的评价标准，而最为普遍的是超越阈值概率方法^[4]。行人风环境超越阈值概率评价法主要包括两个部分：人

体不舒适度，通过风速阈值来界定；风危险性评估，通过超越该阈值的概率大小来评价^[11]。

行人高度处的阵风风速可表示为：

$$u_g = \bar{u} + g\sigma_u \leq u_{limit} \quad (2)$$

其中： \bar{u} 代表平均风速； σ_u 为风速的根方差； g 为保证因子； u_{limit} 为舒适度的风速阈值。这里需要指出的是，不同的研究学者对 g 定义都有所不同，且取值也不一致^[4]，对于时平均风速 $g=0$ 。那么，超越阈值的风速概率则可表示为：

$$P_{exceed} \leq P_{comfort} \quad (3)$$

式中： P_{exceed} 表示风速超过 u_{limit} 的超越概率； $P_{comfort}$ 代表所用评价方法中的超越阈值概率限值。 P_{exceed} 又可表示为：

$$P_{exceed} = P(u_g \geq u_{limit}) \quad (4)$$

表1给出了4种不同评价标准^[4]，表中 $g=0$ 。对于阵风下的舒适性或危险性，则可按式(5)计算出阵风等效平均风速(GEM-Gust Equivalent Mean Speed)，然后参照表1的标准按时平均风评估标准来评估^[9]。

$$U_{GEM} = \frac{U_{Z,gust}}{1.875} \quad (5)$$

式中： U_{GEM} 为阵风等效平均风速； $U_{Z,gust}$ 为当地最大阵风风速；系数1.875为两者间的换算系数。

为了准确确定超越阈值的概率，需要有项目所在区域的常年风速的概率分布函数。目前，常态风分布概率模型基本采用Weibull双参数模型^[13]，对于给定的某一风向 θ 下，建筑物场地附近等效风速超越界限风速 U_{THR} 的概率为：

$$P(u_g \geq u_{limit}) = 100 \cdot A(\theta) \exp \left[- \left(\frac{u_{limit}}{c(\theta)} \right)^{k(\theta)} \right] \quad (6)$$

其中： P 是风向为 θ 时，风速超过 U_{THR} 的概率； $A(\theta)$ 为 θ 风向风出现的概率； $C(\theta)/(m/s)$ 为 θ 风向下的速度； $k(\theta)$ 为 θ 风向下的形状参数。

表1 四种舒适度标准

Table 1 Four types of comfort criteria

人类活动	Michael J Soligo 标准(标准 1)		Force Technology-DMI 标准(标准 2)		Isyumov and Davenport 标准(标准 3)		UWO(Canada)标准(标准 4)	
	$u_{limit}/(m/s)$	超越概率/(%)	$u_{limit}/(m/s)$	超越概率/(%)	$u_{limit}/(m/s)$	超越概率/(%)	$u_{limit}/(m/s)$	超越概率/(%)
长时间坐立(坐)	2.5	20	5	0.1	3.58	1.5	4	5
短时间坐立(立)	3.9	20	5	6	5.37	1.5	6	5
行走(行走)	5	20	5	23	9.85	1.5	10	5

注：人类活动中括号内文字适用于 Michael J Soligo 标准。

根据气象资料风速与风向在高度上的线性假设和相似原理^[5], 结合式(3)、式(4), 超越阈值的概率可以表示为:

$$P(u_g \geq u_{limit}) = \sum_{i=1}^N 100 \cdot A(\theta_i) \exp \left[- \left(\frac{u_{limit}}{c(\theta_i)} \right)^{k(\theta_i)} \right] \quad (7)$$

要想获得式(7)的概率值, 首先要预先获得项目区域气候条件, 即常年风速、风向的分布概率。基于珠海市气象局以及澳门气象资料, 统计分析得到年度风的频度分布和风向分布, 如表 2 所示, 便于与后文对比分析, 图 7 给出了风向分布统计。

表 2 风速与风向分布概率

风速单位/(m/s)

Table 2 Probability distributions of wind speed and wind direction

WD/WS	0~2/(%)	2~4/(%)	4~6/(%)	6~8/(%)	8~10/(%)	10~12/(%)	12~14/(%)	14~16/(%)	16~18/(%)	合计/(%)
N	0.20	3.84	6.65	4.38	1.73	0.37	0.04	0.04	0.00	17.25%
NNE	0.09	2.36	3.79	1.84	0.85	0.11	0.04	0.02	0.00	9.10
NE	0.17	0.67	0.43	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	1.34
ENE	0.00	0.54	0.48	0.26	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	1.30
E	0.07	2.15	2.47	1.08	0.22	0.04	0.02	0.00	0.00	6.05
ESE	0.69	9.82	9.01	2.51	0.35	0.04	0.04	0.04	0.00	22.51
SE	0.46	4.72	3.23	0.98	0.07	0.07	0.02	0.00	0.00	9.53
SSE	0.17	1.86	1.24	0.61	0.04	0.11	0.02	0.00	0.00	4.05
S	0.20	1.24	1.13	0.56	0.07	0.02	0.00	0.02	0.00	3.23
SSW	0.24	2.10	1.60	0.65	0.11	0.02	0.00	0.02	0.00	4.75
SW	0.13	3.71	2.17	0.41	0.13	0.02	0.00	0.00	0.00	6.57
WSW	0.02	0.80	0.43	0.09	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39
W	0.00	0.17	0.04	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33
WNW	0.02	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
NW	0.15	0.50	0.26	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
NNW	0.20	4.90	4.36	1.56	0.39	0.07	0.00	0.04	0.02	11.53
合计	2.80	39.39	37.34	15.10	4.07	0.89	0.20	0.20	0.02	100.00

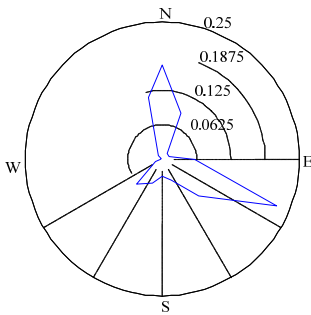


图 7 风向分布统计

Fig.7 Statistics of wind directions

3 结果分析

3.1 测点阵风等效平均风速比

评价风环境标准的主要感受对象是人, 包括舒适度和安全性, 前者会影响到个体的正常活动, 后者则关系到人身安全。由于主要的不舒适和担忧是由阵风造成的, 除平均风速外, 还需借助阵风等效平均风速衡量风速是否超过不舒适度和担忧程度要求的上限, Durgin 给出了求解阵风等效风速的方法以及相应的阵风因子, 其包含舒适

性和危险性两个层面^[14-15]。

风速比反映了由于建筑物的存在而引起风速变化的程度, 通过风速比可以判断建筑物周围的局部强风区。此指标表示强风区内风速增长的倍数。是风环境评价的一个重要参数。一般来说, 对应某一方向, 在一定风速范围内建筑物周围的流场相对固定。即, 风速比一般不随来流风速而变, 它是局部区域对风速放大或缩小效应的直接体现。阵风等效平均风速比可定义为:

$$R_{GEM} = \frac{U_{GEM}}{U_0} \quad (8)$$

其中: U_{GEM} 分别代表测点阵风等效平均风速; U_0 为参考点高度的风速, 方便分析, 一般取高度为 10 m; 行人高取为 2 m。

图 8 给出了 26 个测点区的全风向最大与最小阵风等效平均风速比, 限于篇幅, 本文仅给出前 8 个最大阵风等效平均风速比玫瑰图, 如图 9。

从图 8 可以看出, 全风向下测点在处于被阻挡风向时, 其风速比较小, 达到 0.35; 而当来流风向

能形成峡谷风时，则表现出明显的风速放大效应，达到 1.33，需要指出的是其参考点取为 10 m，换算成等高的 2 m，则放大效应达到 2.22 倍；测点风速的放大效应与缩小效应比值在 1.19(M19)~2.73(M9) 范围。

图 9 的典型测点等风等效平均风速比的玫瑰图

表明，风速放大效应明显的风向均是使得测点在峡谷风效应的作用下形成的。如测点 M9 在 300°~360°风向范围内，由于受到塔楼以及绸带之间形成的喇叭口的气流汇聚作用，相对同高度风速放大了 2.73 倍。类似的现象在其他风速测点均有发现。

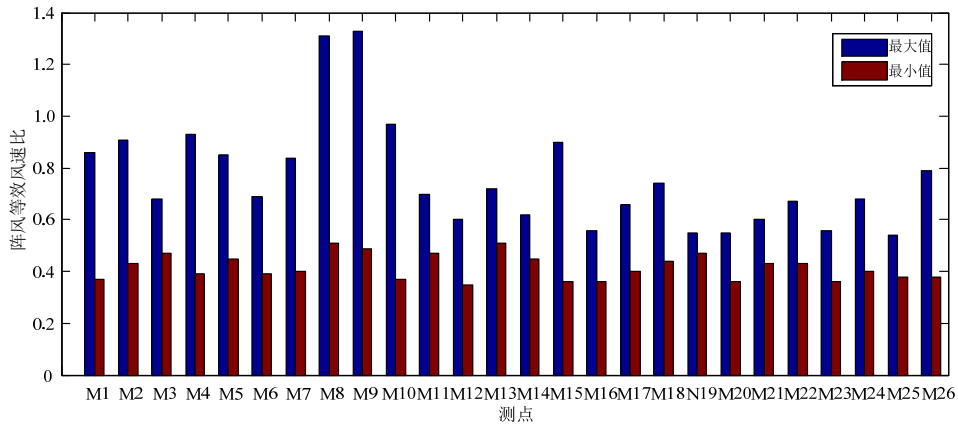


图 8 测点全风向最大与最小阵风等效平均风速比
Fig.8 Max and min GEM of taps within all wind directions

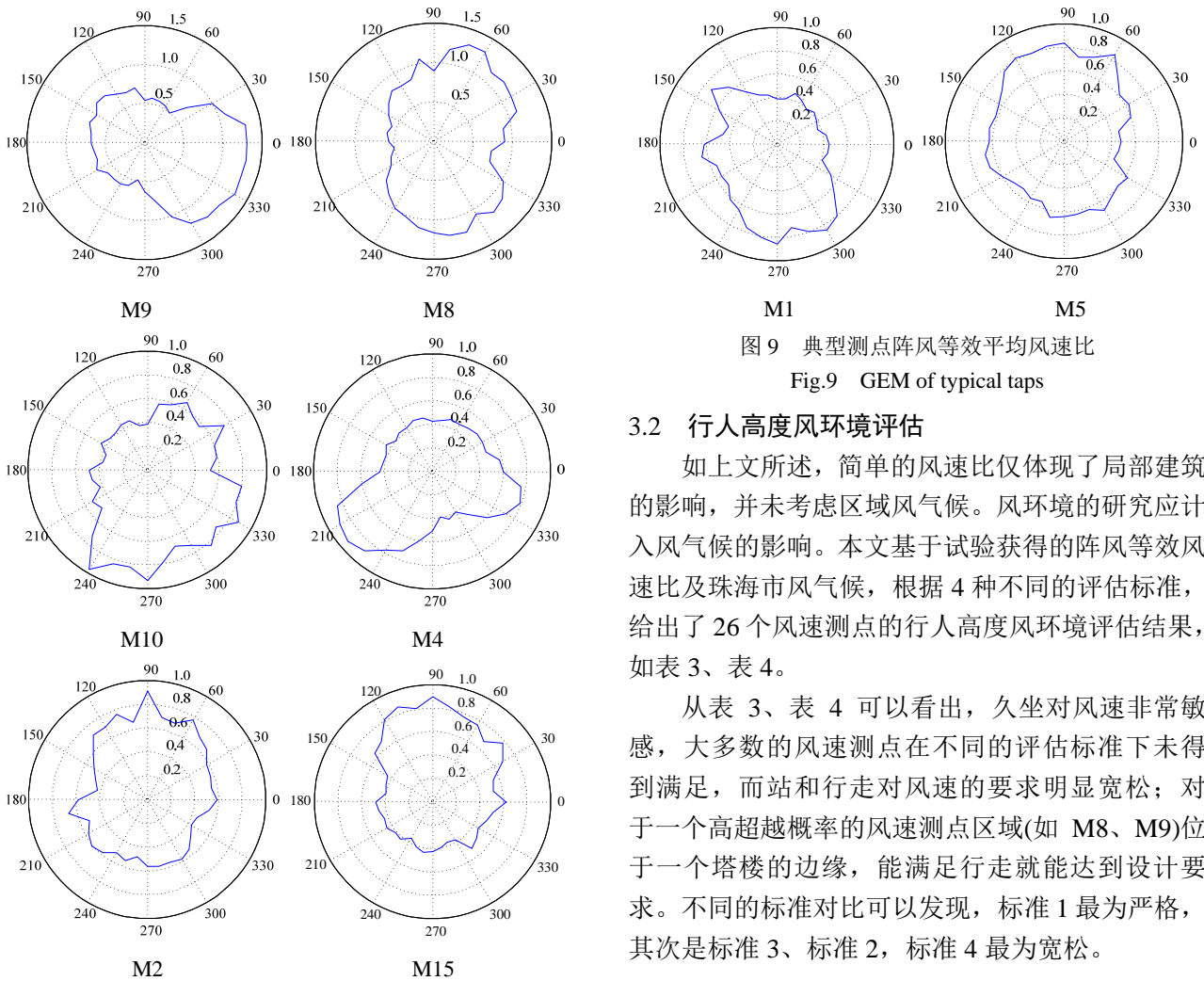


图 9 典型测点阵风等效平均风速比
Fig.9 GEM of typical taps

3.2 行人高度风环境评估

如上文所述，简单的风速比仅体现了局部建筑的影响，并未考虑区域风气候。风环境的研究应计入风气候的影响。本文基于试验获得的阵风等效风速比及珠海市风气候，根据 4 种不同的评估标准，给出了 26 个风速测点的行人高度风环境评估结果，如表 3、表 4。

从表 3、表 4 可以看出，久坐对风速非常敏感，大多数的风速测点在不同的评估标准下未得到满足，而站和行走对风速的要求明显宽松；对于一个高超越概率的风速测点区域(如 M8、M9)位于一个塔楼的边缘，能满足行走就能达到设计要求。不同的标准对比可以发现，标准 1 最为严格，其次是标准 3、标准 2，标准 4 最为宽松。

(续表)

测点	坐				站				行走			
	标准 1	标准 2	标准 3	标准 4	标准 1	标准 2	标准 3	标准 4	标准 1	标准 2	标准 3	标准 4
M17	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
M18	N	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
M19	N	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
M20	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
M21	N	N	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
M22	Y	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
M23	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
M24	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
M25	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
M26	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y

注: Y 为合格; N 为不合格

对于人行道处的风环境应满足步行时的舒适度要求;而对于建筑物的入口,人们可能会在此短暂的逗留或徘徊,因此采用风速较低的站立舒适度要求更为合适。不满足站立舒适度的测点位置 M8 和 M9 位于塔楼的两个入口,此两位置属于塔楼的主入口,因此应对其进行适当的改造措施,特别是测点位置 M8(但其仅略小于行走舒适度标准),可通过在入口位置设置挑蓬或增加植栽来改善其风环境。

在 26 个风速测点区中,对于“坐”,标准 1、标准 2、标准 3、标准 4 分别有 14 个、20 个、18 个、8 个测点不满足要求;对于“站”,分别有 2 个、3 个、7 个、2 个测点不满足要求;对于“行走”,分别有 2 个、1 个、1 个、0 个测点不满足要求。因此可以判断在本试验分析中,针对“坐”、“站”、“行走”三类人类行动,标准 2、标准 3、标准 1 是相对应的最严格标准,而 UWO 标准最为宽松。

4 结论

本文针对某城市综合体进行行人高度风速评估,基于超越阈值概率的判断准则评估其舒适性。得出以下几点结论:

(1) 简单的风速比能准确的判断周边建筑环境对局部区域的风速放大与缩小效应,但比较片面,应与气候条件相结合,才可获得准确的判断结果。

(2) 超越阈值概率的判断方法能有效的评估出与实际气候条件及周边建筑环境相一致的结果。

(3) 由于阵风等效平均风速风速比已考虑舒适性与危险性,故本文给出的基于阵风等效平均风速的超越阈值概率方法亦能有效的涵盖对行人高度

风环境舒适性和危险性的评估。

(4) 针对不同的人类活动,不同的判断标准的宽严程度不同;对于坐,Force Technology-DMI 标准最为严格;对于站,Isyumov and Davenport 标准最为严格;对于行走,Michael J Soligo 标准最为严格;针对不同的人类活动,UWO 标准最为宽松。由于行人风环境受到气候条件、周边环境的影响很大,故而其结论的是否具有普遍性还需开展更多的研究工作。

(5) 需要指出的是,本试验完成于 2010 年,在风场调试过程中采用的是 2010 版的《建筑结构荷载规范》,其 B 类风场流场条件与现行的荷载规范^[16]存在细微差异,对结果有一定的影响。

参考文献:

- [1] 程强,许晓蒙,石娟,等.城市综合体的形成基础研究[J].生态环境,2012,12:163-166.
Cheng Qiang, Xu Xiaomeng, Shi Juan, et al. The study on foundation of HOPSCA's formation [J]. Ecological Environment, 2012, 12: 163-166. (in Chinese)
- [2] Davenport A G. An approach to human comfort criteria for environment wind conditions [C]. Stockholm: Colloquium on Building Climatology, 1972.
- [3] Soligo M J, Irwin P A, Williams C J, Schuyler G D. A comprehensive assessment of pedestrian comfort including thermal effects [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 77/78: 753-766.
- [4] Koss H H. On differences and similarities of applied wind comfort criteria [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(11): 781-797.
陈勇,王旭,楼文娟,等.超越概率阈值风环境评价标准分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2011,39(10):103-107.
- [5] Chen Yong, Wang Xu, Lou Wenjuan, et al. Analysis of

- criteria for wind-environment assessment using threshold of probability of exceedance [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 39(10): 103—107. (in Chinese)
- [6] Bottema M. A method for optimization of wind discomfort criteria [J]. *Building and Environment*, 2000, 35(1): 1—18.
- [7] Sanz-Andres A, Cuerva A. Pedestrian wind comfort: feasibility study of criteria homogenization [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94(11): 799—813.
- [8] 李会知. 城市建筑风环境的风洞模拟研究[J]. *华北水利水电学院学报*, 1999, 20(3): 32—34.
Li Huizhi. Wind tunnel modeling of building wind environment [J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 1999, 20(3): 32—34. (in Chinese)
- [9] 关吉平, 任鹏杰, 周成, 等. 高层建筑行人高度风环境风洞试验研究[J]. *山东建筑大学学报*, 2010, 25(1): 21—25.
Guan Jiping, Ren Pengjie, Zhou Cheng, et al. Wind tunnel test on pedestrian level wind environment around high-rise building [J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2010, 25(1): 21—25. (in Chinese)
- [10] 张爱社, 顾明, 张陵. 建筑群行人高度风环境的数值模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(8): 1030—1033.
Zhang Aishe, Gu Ming, Zhang Ling. Computer simulation of pedestrian wind environment around buildings [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2007, 35(8): 1030—1033. (in Chinese)
- [11] 李朝, 肖仪清, 滕军, 等. 基于超越阈值概率的行人风环境数值评估[J]. *工程力学*, 2012, 29(12): 15—21.
Li Chao, Xiao Yiqing, Teng Jun, et al. Numerical evaluation of pedestrian wind environment using threshold exceedance probability approach [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(12): 15—21. (in Chinese)
- [12] GB 50009-2001, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
GB 50009-2001, Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese)
- [13] Holmes J D. Wind loading of structures [M]. New York: Spon Press, 2001: 27—40.
- [14] Durgin F H. Pedestrian level wind studies at the wright brothers facility, *Progress in Wind Engineering [C]*. Proc. 8th International Conf on Wind Engineering, Elsevier, New York, Part 4, 1992: 2253—2264.
- [15] Durgin F H. Pedestrian level wind criteria using the equivalent average [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 66(3): 215—226.
- [16] GB 50009-2012, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB 50009-2012, Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)