

大型中心城市平均风速剖面特性的风洞试验

全涌¹, 陈洞翔¹, 杨淳^{1,2}, 顾明¹

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 华润(上海)房地产开发有限公司, 上海 201802)

摘要: 用缩尺模型模拟了上海市同济大学四平路校区所处城市中心区域 WNW 方向上 1.8km×8.0km 范围内的真实地貌, 通过对该地貌及其衍生地貌工况的风洞试验研究了城市地貌特征、远场与近场地貌的差异以及地貌起点到观测点的距离对平均风速剖面和相关风场参数的影响。结果表明, 在平均风速剖面发展稳定前, 梯度风高度处于不断升高中, 地貌起点距观测点的距离对其影响较大; 地貌特征对风剖面的影响极大; 研究范围内的大城市中心地貌的地面粗糙度指数达到 0.50~0.75, 远大于我国现行荷载规范给出的大城市中心地貌的地面粗糙度指数 0.30。建筑结构荷载规范中大城市中心地貌的地面粗糙度指数取值有待增大。

关键词: 风场特性; 大型城市; 地貌特征; 风洞试验

中图分类号: O355; TU973.213

文献标志码: A

Wind Tunnel Experiments of the Mean Wind Profile Characteristics over a Large Central City

QUAN Yong¹, CHEN Jiongxiang¹, YANG Chun^{1,2}, GU Ming¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 20092, China; 2. China Resources (Shanghai) Real Estate Development Co. Ltd, Shanghai 201802, China)

Abstract: In the paper, the real buildings within a range of 1.8km×8.0km in a central area of Shanghai along the direction of WNW near Tongji University were reconstructed by scale models. The influence of the urban terrain features, the differences between far and near terrains and the distance between the starting position of the terrain and the observation location on mean wind profiles and wind field characteristics were discussed with wind tunnel experiments. Results showed that the gradient wind height is on the increase, until the wind profile becomes steady, with the increase of the distance

between the starting position of the terrain and the observation location; the wind profile is influenced by terrain features greatly; the ground roughness exponents of the urban district in Shanghai are estimated as 0.50 to 0.75, which is far greater than the corresponding value 0.30 in the load code for the design of building structures in China. The value of ground roughness exponent of the urban district of large cities presented by the load code for the design of building structures should be increased.

Key words: wind field characteristic; large cities; terrain feature; wind tunnel experiment

城市是人类文明的中心, 城市化是全球社会发展的趋势之一。随着我国城市化的进行, 大城市中心区域建筑的平均高度和建筑密度也随之上升, 城市发展总体呈现出以大城市为中心、城市规模不断扩大的情形。城市地貌特征的改变会引起该区域下垫面空气动力学特性的改变, 随之影响其上空的风场特性。科学合理地描述风场特性, 对风敏感结构的风荷载确定、结构风致振动分析和围护结构的抗风设计等意义重大, 关系着工程的经济性和安全性。

研究人员^[1-3]已建立了多种地貌特征与风场特性之间的联系, 主要研究了地貌特征参数(建筑平均高度、建筑迎风面面积指数和建筑迎风向宽度等)与风剖面对数律模型中地面粗糙度长度的关系; Tieleman^[4]指出, 在无障碍开放条件下, 地面粗糙度长度 z_0 随地貌变化产生显著变化, 梯度风高度随着风速的增大而增大; Hagishima 等^[5]研究了地貌特征对零平面位移 z_d 和拖曳力系数的影响; Hjelmfelt^[6]研究了城市下垫面与非城市下垫面对大气边界层结构的影响。

国际上通常将地貌类别分为海上、乡村、郊区和

收稿日期: 2019-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(51778493, 51278367); 土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题(SLDRCE15-B-03)

第一作者: 全涌(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为高层建筑抗风与风速风振实测。E-mail: quanyong@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

市区4类。其中市区地貌的相关参数主要基于欧美日发达国家普通城市上空风场实测数据得到。我国现行荷载规范也将地面粗糙度类型分为A、B、C和D共4类,分别对应海上、乡村、城市和大城市中心地貌,并参考国际规范给定了相关参数。但由于我国人口众多、土地资源有限,国内大型中心城市的建筑分布形态与国外有明显的差异,其建筑平均高度和建筑密度均远大于欧美国家的普通城市。研究^[7-8]表明,规范给定的D类地貌的相关风场参数的取值有待考证,如地面粗糙度指数 α 具有一定保守性,不利于实现工程安全性与经济性之间的平衡,相关问题亟待进一步研究解决。

目前,国内对城市地貌上空风场特性的研究主要采用实测手段,重心多在台风作用下的低空风场,且通常将风场特性与地貌特征割裂开来单独研究^[9-10],未量化描述地貌特征对风场特性的影响;风洞试验研究中通常采用理想的粗糙元模拟不同地貌^[11-12],但考虑的地貌范围一般较小,其结论的普遍性有待考证。

本文用缩尺模型还原了上海市杨浦区同济大学土木工程馆WNW方向上 $1.8\text{km}\times 8.0\text{km}$ 矩形区域的真实地貌,通过改变模型摆放位置,设计了不同工况,利用风洞试验手段研究了城市地貌特征、地貌起点距观测点的距离以及远场与近场地貌的差异对良态强风风剖面的形成与发展的影响,分析各因素对地面粗糙度指数及梯度风高度等的影响程度。

1 风洞试验概况与地貌特征参数

1.1 试验设备与模型

试验于同济大学土木工程防灾国家重点实验室TJ-1大气边界层风洞中进行。该风洞试验段高 1.8m 、宽 1.8m 、长 12m 。试验参考高度处的风速由皮托管和微压计来监控测量;风剖面的测定由自制风速管系统和DSM3400电子压力扫描阀系统完成。

自制风速管系统是试验所用的主要设备之一。它整体上由3根钢柱焊接在底座组成,在迎风面处的竖直钢柱上由下至上依次布置了一系列的空心钢针,作为风速采集点,各空心钢针尾端用橡胶管连接到电子压力扫描阀系统,从而获得一定风速下各测点的风压时程。

试验前,在2017年1月10日至3月2日期间,于上海市杨浦区同济大学土木工程馆楼顶平台应用WINDCUBE S100多普勒激光雷达测得了该处

$75\text{m}\sim 1\,000\text{m}$ 高度内共计38h的有效冬季良态风的风速风向数据。

本试验选取地貌特征变化多样、实测样本数据较多且实测地面粗糙度指数较大的主导风向WNW方向,还原了该方向上 $8.0\text{km}\times 1.8\text{km}$ 范围内的真实地貌(见图1),并将其等分成8个连续的 $1.0\text{km}\times 1.8\text{km}$ 的地块,分别记为地块1~8。地块5、6和8上的建筑主要是分布稀疏的底面较大的中高层工商业建筑,其余地块则以分布密集的底面较小的高层、超高层住宅建筑为主。

将建筑物简化为不同尺寸的长方体,用塑料泡沫制成试验模型,几何缩尺比为 $1:1\,000$ 。试验所用部分测量设备和模型在风洞中摆放的相对位置如图2所示。

在模拟区域上游的来流入口处,来流为均匀层

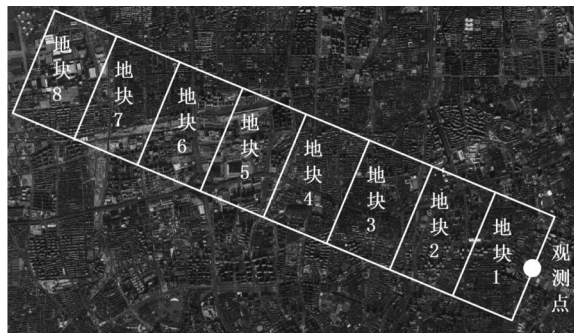


图1 WNW方向上 $8.0\text{km}\times 1.8\text{km}$ 范围内的真实地貌
Fig. 1 The terrain in the WNW direction within an area of $8.0\text{km}\times 1.8\text{km}$



图2 试验部分测量设备及模型的布置
Fig. 2 The arrangement of equipments and models

流。模拟区域内铺设了 8m 长的木板用于固定建筑模型,木板上表面与风洞地面的高差为 15mm 。均

匀层流受该高差的影响,会产生一定的湍流度并发展出边界层。在木板上安置建筑模型前,来流流过8m长木板到达模拟区域末端的观测点位置时,形成的边界层平均风速剖面指数为0.12,风洞0.10m(实际100m)高度处的湍流度为0.075。

1.2 试验工况设置

试验共设计了14个工况,在来流入口到观测点之间,各工况所用到的地块及其排放顺序如图3所示。其中,工况8为完整的实际地貌。

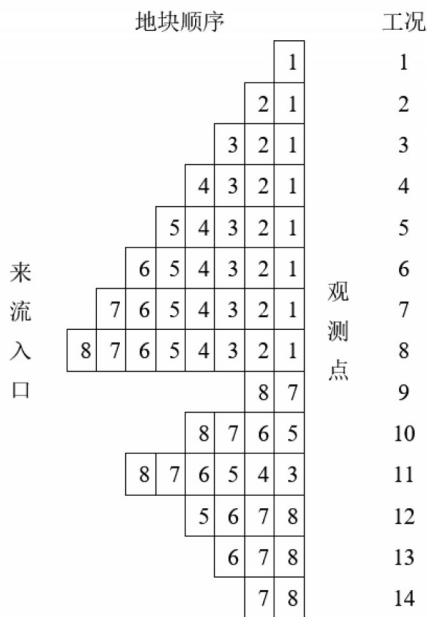


图3 各工况对应的地块顺序

Fig. 3 The arrangement of blocks corresponding to cases

1.3 地貌特征参数

本文所指的地貌特征反映的是一定区域内建筑自身的几何特征、其在空间上的分布特性以及建筑群落与所在场地之间的相互关系。

目前的相关研究中涉及最多的地貌特征参数是建筑平均高度 $z_H = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_n$ 、迎风面面积指数 $\lambda_f = A_f/A_d$ 和建筑密度 $\lambda_p = A_p/A_d$ 等参数,其中 H_n 是各建筑的高度; N 是地块内建筑物的数量; A_f 是地块内所有建筑物的迎风面面积之和,即各建筑迎风面宽度与其高度之积的总和; A_d 是地块总面积; A_p 是地块内全部建筑的平面投影面积之和,即各建筑底面宽度与长度之积的总和。表1给出了8个地块相应

表1 各地块对应的地貌特征参数

Tab. 1 Terrain parameters corresponding to blocks

地块	z_H/m	$\lambda_f/\%$	$\lambda_p/\%$	N
1	24.7	30.1	21.2	762
2	27.9	25.4	14.6	421
3	23.7	30.9	17.3	608
4	23.2	31.8	19.5	608
5	21.8	12.9	20.4	217
6	20.5	18.3	18.9	378
7	18.3	25.3	20.4	598
8	12.9	10.2	21.5	140

2 风场特性影响因素分析

2.1 上游来流风速的影响

图4给出了不同来流风速下工况8的归一化平均风速剖面。图4表明,除了 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 低试验风速下的风剖面外,其余风剖面形状具有较高的一致性:在60m高度以下,风速受地面摩擦力的影响较大,风速变化不明显,且并不满足指数律风剖面规律。随着高度的增加,风剖面指数律的规律性逐渐明显,在达到450m梯度风高度后,风速已不再变化。由图4可知,高试验风速下的风剖面更为稳定。故除特别说明外,后续分析均采用 $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 高试验风速下的数据进行。

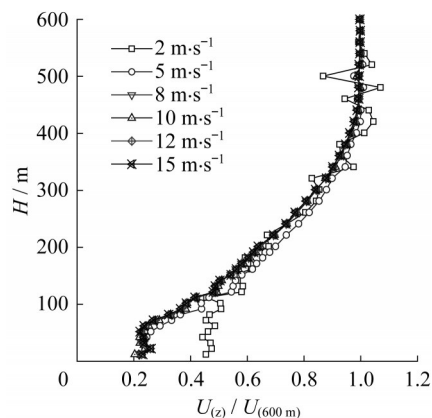


图4 不同来流风速下的风剖面

Fig. 4 Wind profiles under different wind velocities

2.2 地貌起点与观测点之间的距离的影响

图5a是以观测点500m高度处的风速为参考的工况1~8的归一化平均风速剖面。各工况对应的地貌起点距观测点的距离 L 分别为1km、2km、...、8km。由图5a可知, L 对风剖面形状及梯度风高度的影响极大。整体上讲,梯度风高度 H_g 随着 L 的增大而增大;梯度风高度以下,在相同高度处, L 越大,风速越小。在 $L \geq 5\text{km}$ 后,风剖面形状随 L 的变化程度较小,说明地貌起点距观测点的距离超过一定

值后,远场地貌对风剖面的影响程度会减弱。由于观测点与地块 1 水平距离较近,近地面 50m 高度以

下的风剖面均未显示出稳定的规律,其仅反映局部非稳定的流场特征。

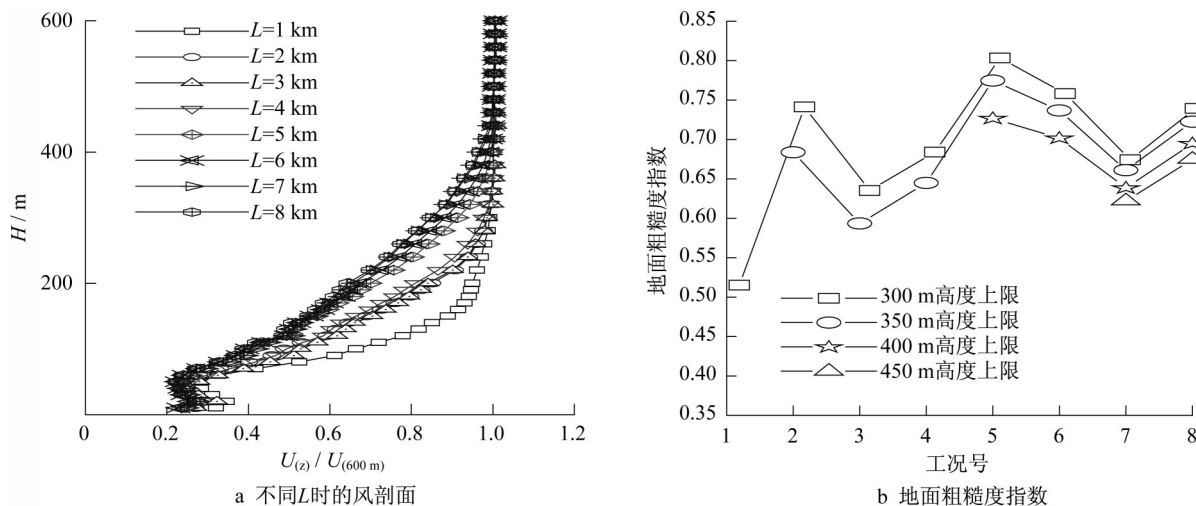


图 5 各工况的风剖面及地面粗糙度指数

Fig. 5 Wind profiles and the ground roughness exponents

图 5b 给出了以 70m 为高度下限、不同高度上限情况下拟合得到的各工况下的地面粗糙度指数 α 值。整体上讲,地面粗糙度指数主要分布在 0.60~0.75 以内,其随 L 的增大基本呈增大趋势。对同一个工况而言,在梯度风高度以内, α 随着拟合高度上限的增加而减小。

各工况的梯度风高度 H_g 及各工况在 70m 至梯度风高度区间内的地面粗糙度指数拟合值见表 2,拟合值均远大于建筑结构荷载规范给定的 D 类地貌的地面粗糙度指数 0.30。

表 2 各工况梯度风高度及地面粗糙度指数拟合值
Tab.2 Gradient wind height and fitted values of ground roughness exponent

工况	α	H_g/m	工况	α	H_g/m
1	0.51	300	5	0.73	400
2	0.68	350	6	0.70	420
3	0.59	350	7	0.62	460
4	0.64	380	8	0.67	450

2.3 地貌特征的影响

为研究地貌特征的影响,设置了 3 个工况组。工况组 I:工况 2、9 和 14;工况组 II:工况 3 和 13;工况组 III:工况 4、10 和 12。对应的地貌起点距观测点的距离 L 分别为 2km、3km 和 4km。表 3 是这 3 个工况组对应的地貌特征参数。

图 6 是以观测点 500m 高度处的风速为参考的各工况组的归一化风剖面。由图 6a 可知,在相同的 L 下,工况 2 由于 3 个地貌特征参数均较大,其风剖

表 3 不同工况对应的地貌特征参数

Tab.3 Terrain parameters corresponding to cases

工况组	工况	z_H/m	$\lambda_f/\%$	$\lambda_p/\%$
I	2	26.3	27.8	17.9
	9/14	15.6	17.8	21.0
II	3	25.4	28.8	17.7
	13	17.2	17.9	20.3
III	4	24.9	29.6	18.2
	10/12	18.4	16.7	20.3

面形状与另 2 个工况差异极大,在近地面附近尤其明显。工况 9 和 14 的地貌特征参数值虽然一致,其风剖面形状总体上却存在细微差异,且近地面局部风剖面形状存在明显差异,后者可能是由于观测点位于不同建筑的尾流影响区域引起的。

此外,工况 9 和工况 14 风剖面的变化趋势在 120m 高度处均发生了明显变化,出现该现象的原因可能是, L 较小时,来流发展不充分,地貌对风剖面的影响仅反映在其高度较低的区段^[13],高度较高区段上的风剖面还未受到影响。

由图 6b 可知,工况 3 和工况 13 的地貌特征参数的差异导致二者风剖面差异较大。对比工况 13 与工况组 I 中的工况 14,在 L 增大 1km 后,风剖面形状的变化已不再表现出分段特征。

表 4 给出了不同高度区间内各工况的地面粗糙度指数 α 的拟合值。纵观 3 个工况组内 α 值最大的工况 2、3 和 4,发现其对应的地貌特征参数均是同组内最大的,证明地貌特征参数的大小对地面粗糙度指数有极大的影响。

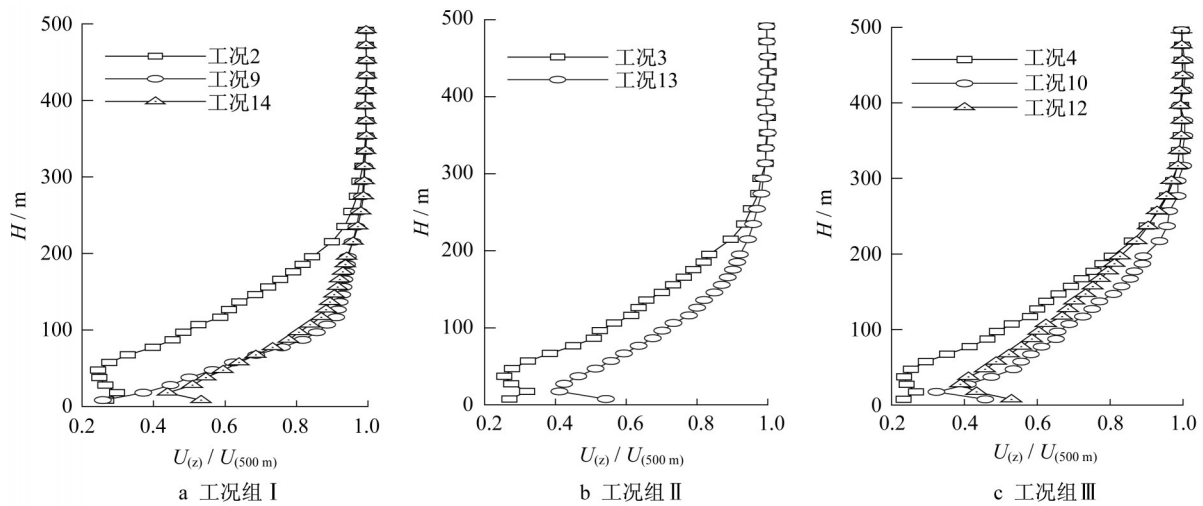


图6 各工况组的归一化平均风剖面

Fig. 6 Normalized mean wind profiles corresponding to cases

表4 不同高度区间内各工况的地面粗糙度指数
Tab. 4 Ground roughness exponents in different height interval

工况组	工况	高度区间/m	α
I	2	50~250	0.79
	9	20~120	0.57
		120~250	0.14
		20~120	0.45
		120~250	0.20
II	3	50~250	0.64
	13	50~250	0.35
	4	50~250	0.71
III	10	50~250	0.39
	12	50~250	0.45

工况组Ⅲ中,工况10和工况12是由地块5~8顺序和逆序排列形成的。整体上讲,地块5~8的建筑密度及平均高度变化不大,而迎风面面积指数呈递增趋势,因此二者风剖面的差异能反映该参数变化趋势不同引起的影响。由表4可知,工况12的地面粗糙度指数比工况10的相应值大15.38%。说明在相同的地貌参数下,迎风面面积指数较大的地块处于近场还是远场对同一地点的地面粗糙度指数有影响。因此,地貌的变化趋势也是影响风剖面的因素,较粗糙的地貌处于近场时,地面粗糙度指数比其位于远场时有所增大。

2.4 风剖面的发展变化过程

图7给出了工况9、10、11和工况8下的平均风剖面,各工况对应的地貌起点距观测点的距离 L 分别为2km、4km、6km和8km。图7反映了来流从入口出发每经过2km长度的地貌后平均风剖面 and 梯度风高度的变化。

可以明显地看出梯度风高度在不断上升,各位

置的风剖面形状都有所不同。相比于工况10($L=4\text{km}$),工况11($L=6\text{km}$)在观测点近场新增了地块3和地块4,这2个地块的迎风面指数较工况10中地块的相应值突增了50%,因此工况10中100m高度以下已发展稳定的风剖面规律遭到了扰动,该扰动在来流再次经过2km后才有所平缓。

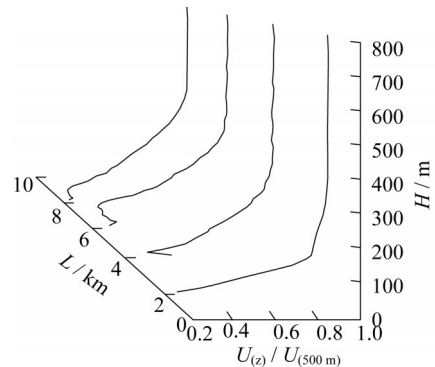


图7 平均风剖面 and 梯度风高度的发展变化过程

Fig.7 The developing of mean wind profile and gradient wind height

3 结论

在风洞中模拟了上海市中心某一区域内的真实城市地貌,研究了来流风速、地貌起点到观测点的距离、地貌特征及其变化趋势对风场特性的影响。量化描述了上述因素对梯度风高度、平均风速剖面形状以及地面粗糙度指数的影响,得到了以下结论:

- (1)随着来流风速的增大,平均风速剖面指数规律性逐渐明显,呈现出稳定的指数律规律。
- (2)地貌起点与观测点之间的距离 L 对梯度风

高度及地面粗糙度指数的影响极大。整体上讲,二者随 L 的增大而增大; L 增大到一定程度后,更远的地貌对观测点风剖面的影响会消失。

(3)研究区域内70m至梯度风高度范围内的地面粗糙度指数在0.50~0.75之间,荷载规范中D类地貌的规定值0.30远小于上述值,这会导致该区域建筑结构风荷载计算结果过于保守。

(5)地貌特征对平均风速剖面形状和地面粗糙度指数的影响较大。即使场地的地貌特征参数和地貌范围相同,观测点附近地貌与远端地貌的差异及地貌特征的变化趋势对风场特性仍存在影响。粗糙地貌处于观测点附近时,比其位于观测点远端时对地面粗糙度指数的影响更大。

(6)在平均风速剖面发展变化过程中,梯度风高度处于不断升高中,地貌特征的变化会体现在平均风速剖面形状上。

参考文献:

- [1] Lettau H H. Studies of the three-dimensional structure of the planetary boundary layer [M]. [s.l.]: University of Wisconsin Department of Meteorology, 1961.
- [2] Raupach M R. Rough-wall turbulent boundary layers [J]. Applied Mechanics Reviews, 1991, 44(1):1.
- [3] Rotach M W. Determination of the zero plane displacement in an urban environment [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1994, 67(1/2):187.
- [4] Tieleman H W. Strong wind observations in the atmospheric surface layer [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(1): 41.
- [5] Hagishima A, Tanimoto J, Nagayama K, *et al.* Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular blocks with various geometries[J]. Boundary-Layer Meteorol, 2009(132):315.
- [6] Hjelmfelt M R. Numerical simulation of the effects of St. Louis on mesoscale boundary layer airflow and vertical air motion: simulations of urban vs. non-urban effects [J]. Journal of Applied Meteorology, 1982, 21:1239.
- [7] 张正维,杜平,ANDREW Allsop. 高层建筑抗风设计中存在的问题与对策探析[J]. 建筑结构, 2018, 48(18):8.
ZHANG Zhengwei, To Alex, ANDREW Allsop. Analysis of problems and countermeasures in wind-resistant design of high-rise buildings[J]. Building Structure, 2012, 48(18):8.
- [8] 鄧伦海,姜舒亚. 多国规范城市地貌风特性关键参数的对比研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(4):100.
ZHI Lunhai, JIANG Shuya. Comparative study of major international wind codes for wind characteristics over urban area [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(4):100.
- [9] 夏冬生. 北京城区大气稳定性及近地强风特性实测研究[D]. 北京:北京交通大学, 2015.
XIA Dongsheng. Field Measurements of atmospheric stability and strong wind characteristics near ground in urban area of Beijing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [10] 鄧伦海. 城市中心边界层风特性及超高层建筑动力响应研究[D]. 长沙:湖南大学, 2011.
ZHI Lunhai. Research on boundary layer wind characteristics over urban area and dynamic responses of tall buildings [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [11] Cheng H, Haydena P, Robinsa A G, *et al.* Flow over cube arrays of different packing densities [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007 (95):715.
- [12] 李元齐, YUKI Toamura, 沈祖炎. 风洞试验中风剖面的模拟及近流场特性分析[J]. 空气动力学学报, 2005, 23(3):382.
LI Yuanqi, YUKI Toamura, SHEN Zuyan. Wind profile modeling in boundary layer wind tunnel and characteristic analysis on simulated approach flow [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2005, 23(3):382.
- [13] Engineering Science Data Unit. Strong winds in the atmospheric boundary layer, part 1: Mean-hourly wind speeds [M]. London: Engineering Science Data Unit, 1984.