

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202012050



# 考虑下垫面复杂性的行人风环境评估

邓建勋<sup>1</sup>, 李司冉<sup>1,2</sup>, 张祥敏<sup>2</sup>, 胡海涛<sup>2</sup>, 钱长照<sup>2</sup>, 陈昌萍<sup>1,2</sup>

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005;  
2. 厦门理工学院 风灾害与风工程福建省重点实验室, 福建 厦门 361024)

**摘要:** 为解决城市下垫面给风环境评估带来的困难,建立地形-建筑物耦合模型进行风洞试验,研究某桥址区风环境变化规律;采用三参数 Weibull 分布对实际下垫面影响下气象数据进行拟合;结合拟合参数和试验风速比得到桥面行人舒适度超越阈值概率。结果表明:桥址区风速受山体的阻挡作用而减小,同时桥址区风速受城市建筑拖曳作用和街道风加速效应明显;结合三参数 Weibull 分布拟合得到的参数,桥面两端行人舒适度较高,同时桥面跨中位置处受街道风影响较大,易产生行人不舒适感。

**关键词:** 城市下垫面; 行人风环境; 风洞试验; 超越阈值概率; Weibull 分布

**中图分类号:** TU 12      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2021)06-0784-08

## Evaluation of Pedestrian Wind Environment on Considering Underlying Surface Complexity

DENG Jianxun<sup>1</sup>, LI Siran<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiangmin<sup>2</sup>,  
HU Haitao<sup>2</sup>, QIAN Changzhao<sup>2</sup>, CHEN Changping<sup>1,2</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;  
2. Key Laboratory of Wind Disaster and Wind Engineering of Fujian Province,  
Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

**Abstract:** In order to solve the difficulties of wind environment assessment caused by urban underlying surface, to establish terrain-building coupling model for wind tunnel test, and to study the wind environment of a bridge site, 3-parameter Weibull distribution is used to fit the meteorological data under the actual influence of the underlying surface. Combining with the fitting parameters and test wind speed ratio, the threshold exceedance probability of pedestrian comfort on the bridge deck is obtained. The results show that the wind speed in the bridge site is reduced by the blocking effect of mountains, and the wind speed in the bridge site is obviously affected by the drag effect of urban buildings and the acceleration effect of street wind. Combining with the parameters fitted by 3-parameter Weibull distribution, the pedestrian comfort at both ends of the bridge deck is high, the mid-span of the bridge deck is affected by the street wind, which is easy to cause uncomfortable feeling for pedestrians.

**Keywords:** urban underlying surface; pedestrian wind environment; wind tunnel test; threshold exceedance probability; Weibull distribution

随着我国城市的快速发展,下垫面的复杂程度越来越高,建筑物和地形的改变易引发行人风环境的

**收稿日期:** 2020-12-24

**通信作者:** 陈昌萍(1971-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事结构风工程、城市风环境的研究. E-mail: cpchen@hnu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51778551);福建省厦门市建设局科技计划项目(XJK2017-1-10)

不舒适问题. 目前, 风洞试验被广泛应用于行人风环境的研究中, 陈德江等<sup>[1]</sup>利用风洞试验研究某高层建筑周边群体建筑群的风环境, 结果表明, 建筑风环境满足舒适性条件; 马文勇等<sup>[2]</sup>利用风洞试验对群体建筑周边风环境进行研究, 发现群体建筑的夹缝与角区的风速值较大; 关吉平等<sup>[3]</sup>通过风洞试验研究群体建筑风环境的干扰效应, 得到高层建筑建成后尾流区对周边风环境的影响结果; 唐春朝等<sup>[4]</sup>利用风洞试验研究高耸建筑对周边小区风环境的影响, 发现高耸建筑的建设降低了小区风环境的舒适度. 然而, 目前风洞试验研究城市风环境选取的研究范围较小, 地表特征均为城市平坦区域, 忽略了城市地形对风环境的影响. 同时, 试验得到的风环境变化规律需要进行进一步评价分析, 学者们主要采用超越阈值概率法进行评估. 陈勇等<sup>[5]</sup>对超越阈值概率的风环境评价标准作出统一划分; 李朝等<sup>[6]</sup>综合考虑阵风效应, 利用超越阈值概率法对复杂建筑的行人舒适度和危险度作出评价; 文献[7-10]利用超越阈值概率法, 评价研究区域的行人风环境舒适度. 在前期对气象数据的处理中, 研究者默认采用双参数 Weibull 分布对超越阈值概率进行计算, 并没有考虑双参数 Weibull 分布与实际风速概率分布的拟合程度.

针对目前研究的不足, 本文以福建省厦门市某桥址区为研究对象, 建立较大范围的地形和城市建筑物叠加的风洞试验模型, 对桥址区风环境变化作出精确判断; 利用极大似然估计法估算三参数 Weibull 分布的位置参数<sup>[11-14]</sup>, 并对气象数据进行拟合; 引入带有位置参数的三参数超越阈值概率计算公式, 对人行桥桥面的行人风环境进行评估.

# 1 复杂下垫面风洞试验

## 1.1 试验模型及风洞概况

采用风洞试验研究福建省厦门市某桥址区风环境. 建立地形-建筑物耦合模型, 模型以桥址为中心, 选取 2.5 km 直径范围内的地形及建筑物制作几何模型, 地形区域内有两座山, 海拔分别为 212, 139 m. 模型缩尺比为 1 : 600, 阻塞率均小于 5%. 试验模型, 如图 1(a) 所示. 试验在厦门理工学院 XMUT-WT 风洞实验室低速试验段进行, 数据采集采用移测架和 TFI 眼镜蛇三维脉动风速仪相结合的方式; 试验风场采用 B 类风场和均匀场作为来流条件. B 类风场采用尖劈和粗糙元调试, 如图 1(b) 所示. 模拟的平均风速剖面 and 湍流度剖面, 如图 2 所示. 图 2 中:  $h$  为风洞试验边界层高度;  $v$  为平均风速;  $I$  为湍流度.

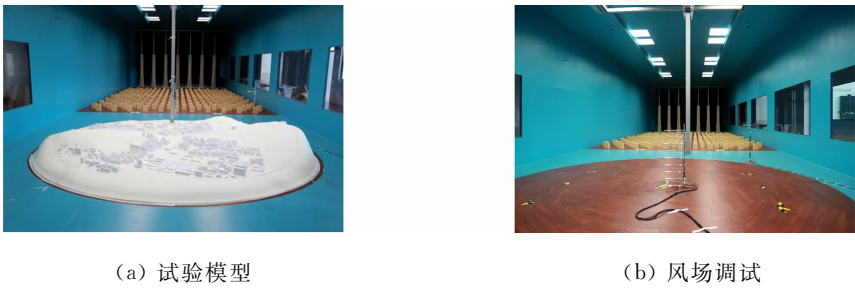


图 1 试验概况

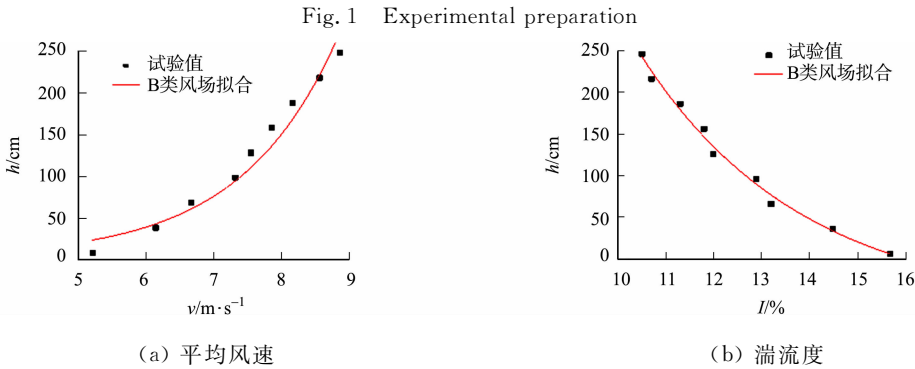


图 2 平均风速剖面 and 湍流度剖面

Fig. 2 Average wind speed profile and turbulence profile

## 1.2 计算工况及测点布置

该人行桥梁为曲线悬索桥, 曲线桥全长为 216.7 m, 桥轴线长为 202.2 m, 桥梁轴线与水平(东西方

向)成  $38^\circ$ , 桥面高度距离地面 34.52 m. 结合两座山体位置及建筑物排布影响, 以正北为第 1 个工况, 角度间隔  $45^\circ$  为 1 个工况, 共设置 8 个工况.

桥址位置, 如图 3(a) 所示, 在桥面设置 9 个监测位置. 同时, 对桥址所处的城市街道及山体布置测点, 监测街道风环境变化, 监测位置, 如图 3(b) 所示.

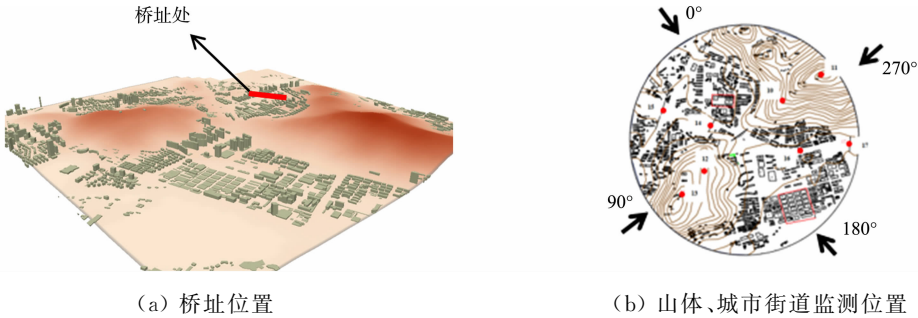


图 3 测点布置图  
Fig. 3 Arrangement of measuring points

1.3 试验结果及分析

1.3.1 复杂下垫面影响下的桥面行人高度处风速比 定义桥面行人高度处平均风速  $v_i$  与入流相同高度处平均风速  $v_0$  之比为桥面行人高度处风速比  $R_i$ , 表达式为

$$R_i = v_i / v_0. \tag{1}$$

城市街道是城市内部的通风廊道, 容易形成街道峡谷风. 均匀场和紊流场下, 桥面行人高度处与街道同高度处的风速比散点分布图, 如图 4 所示. 图 4 中:  $R_u, R_i$  分别为均匀场和紊流场的风速比.

由图 4 可知: 均匀场和紊流场风速比变化基本一致, 线性拟合斜率在 0.56~0.66 之间, 证明了风洞试验数据的真实可靠性; 而桥面行人高度处风速比拟合线段在城市街道同高度处风速比拟合线段下方分布, 说明该桥址区在部分风向下不是风速放大区域, 主要原因是城市建筑物及山体对风速的阻挡效应.

为了了解不同工况下桥面行人高度处风速比的变化, 选取受城市冠层影响较大的  $0^\circ$  和  $180^\circ$  工况及受山体影响的  $90^\circ$  和  $270^\circ$  工况进行分析, 结果如图 5 所示. 由图 5 可知:  $0^\circ$  和  $180^\circ$  工况下, 桥面行人高度处风速比最大值为 1.18, 最小值为 0.43, 受城市下垫面阻挡效应影响, 桥面行人高度处风速比整体较小, 风速比大于 1 的情况是受街道峡谷风影响;  $90^\circ$  和  $270^\circ$  工况受山体影响下, 桥面行人高度处风速比基本均小于 1. 桥址的起点和终点均在山脚位置, 山脚处为平均风速的减速区域.

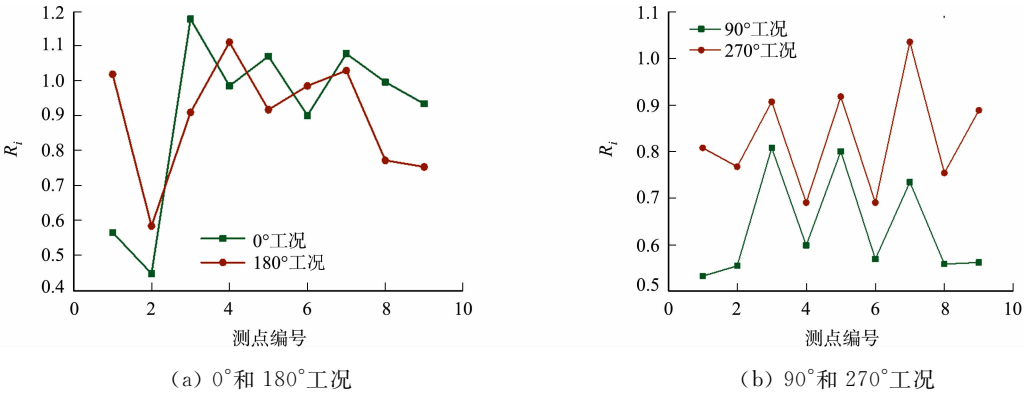


图 5 不同工况的桥面行人高度处风速比

Fig. 5 Wind speed ratios at pedestrian height of bridge deck under different working conditions

1.3.2 复杂下垫面影响下的平均风速剖面 桥址区风速剖面受下垫面地表特征影响, 风速变化情况不

同. 不同工况的平均风速剖面, 如图 6 所示. 图 6 中:  $H/H_r$  为无量纲化高度;  $v/v_r$  为无量纲化平均风速.

由图 6 可知:  $0^\circ$  和  $180^\circ$  工况的平均风速剖面与来流风速剖面有较大差异,  $0^\circ$  工况由于城市主要街道入口与来流夹角较小, 桥址区前方没有建筑物的遮挡而形成街道峡谷风, 使平均风速增大, 而  $180^\circ$  工况由于地表建筑物的拖曳作用, 在无量纲高度为 0.35 下风速减小, 当无量纲高度大于 0.35 时, 风速剖面重现出指数率剖面;  $90^\circ$  和  $270^\circ$  工况下, 平均风速均小于来流风速, 说明山体遮挡作用下桥址区为平均风速的减速区域.

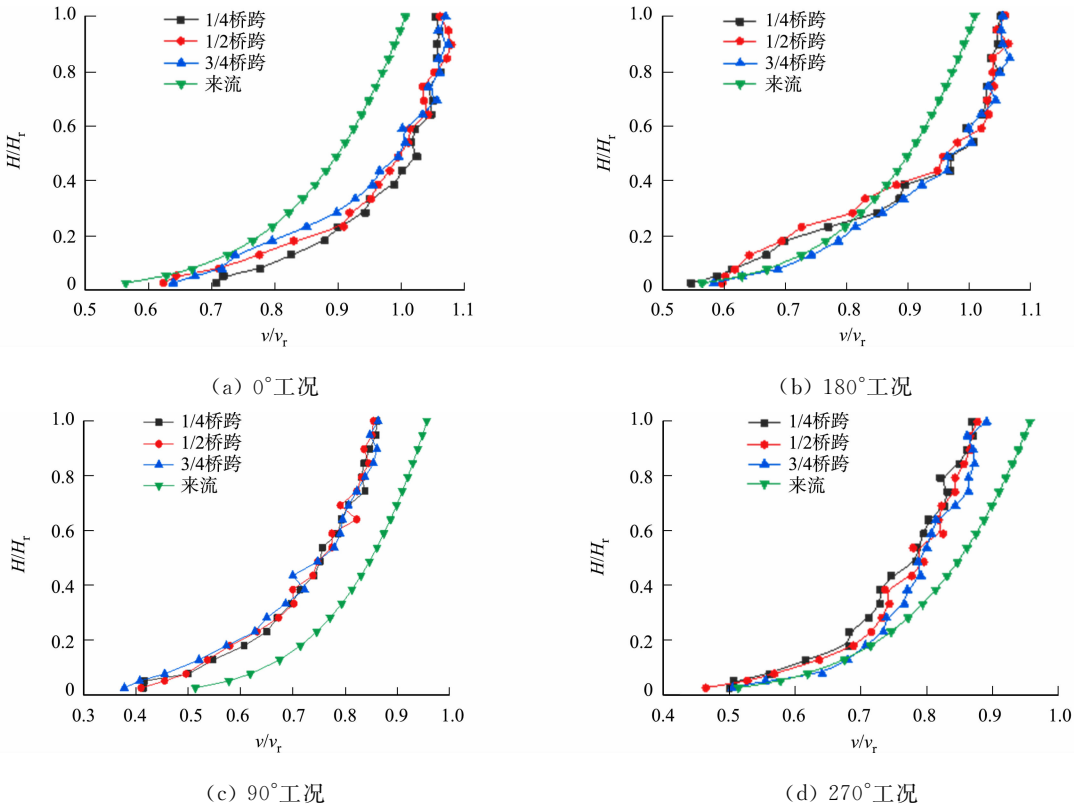


图 6 不同工况的平均风速剖面

Fig. 6 Average wind speed profile under different working conditions

山体典型位置的平均风速剖面变化, 如图 7 所示. 图 7 中:  $s$  为测点到山体边缘的距离. 两座山体背风面及迎风面山脚处均为平均风速的减速区域. 当不同山体前后排列时, 山脚处的平均风速减速效果不同. 海拔较高、坡度较陡的山体正对来流时, 山顶风速的急剧增大, 导致  $270^\circ$  工况下山脚处的平均风速均大于  $90^\circ$  工况下山脚处的平均风速.

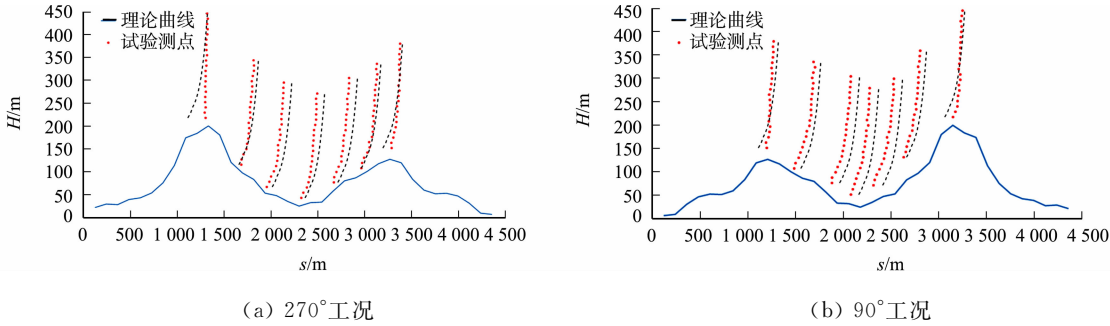


图 7 山体典型位置的平均风速剖面变化

Fig. 7 Variation of average wind speed profile at typical locations of mountains

为了量化平均风速剖面与入流风速剖面的变化, 利用最小二乘法拟合不同风向角 ( $\theta$ ) 下的风速剖面指数 ( $\lambda$ ), 结果如表 1 所示. 由表 1 可知: 在地形和建筑物影响下, 风速剖面指数均不满足规范要求, 该桥址区地表粗糙度类型更接近 C 类地表;  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  和  $270^\circ$  工况的风速剖面指数变化最为明显,  $0^\circ$  和  $180^\circ$  工况的风速剖面指数增大分别受街道峡谷风和地表建筑物拖曳作用的影响,  $90^\circ$  和  $270^\circ$  工况的风速剖面

指数变化是受山体影响.

表 1 不同风向角下的风速剖面指数

Tab. 1 Wind speed profile index under different wind directions

$\theta/(^{\circ})$	$\lambda$			$\theta/(^{\circ})$	$\lambda$		
	1/4 桥跨	1/2 桥跨	3/4 桥跨		1/4 桥跨	1/2 桥跨	3/4 桥跨
0	0.342 06	0.338 63	0.336 29	180	0.328 43	0.327 46	0.331 14
45	0.326 96	0.328 50	0.329 20	225	0.273 50	0.274 94	0.279 34
90	0.278 43	0.277 60	0.278 51	270	0.260 74	0.287 75	0.292 28
135	0.298 48	0.300 10	0.301 66	315	0.334 07	0.326 43	0.321 59

1.3.3 复杂下垫面影响下的湍流度 湍流度反映脉动风对行人风环境的影响. 对桥址区湍流度进行监测,不同风向角的湍流度剖面,如图 8 所示.

由图 8 可知:0°和 180°工况下,当无量纲高度小于 0.6 时,其湍流度均大于来流风场的湍流度,原因是试验模型改变了地表粗糙度,增大了湍流度;180°工况下出现湍流剪切区域,考虑为建筑群较大且较密集,导致高端流度的出现;山体影响下,90°和 270°工况下,桥址区均为湍流的放大区域.

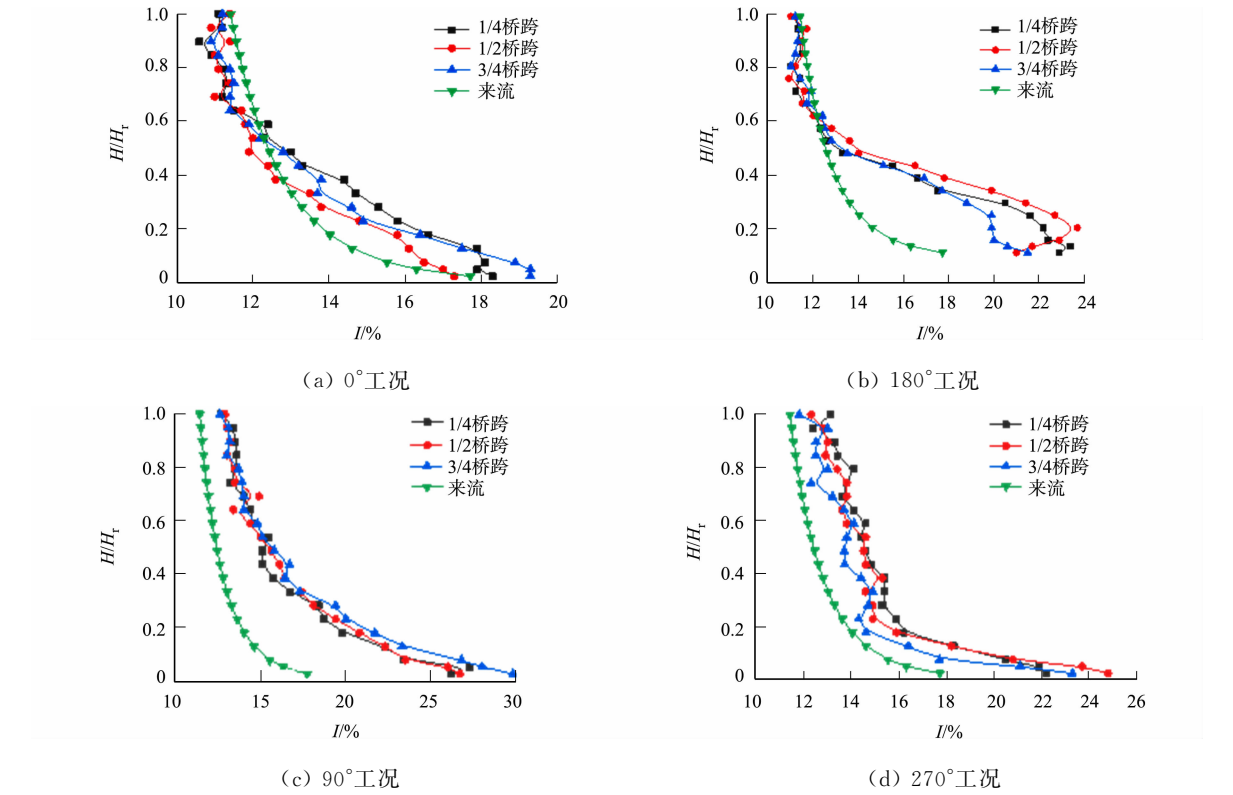


图 8 不同风向角的湍流度剖面

Fig. 8 Turbulence profile at different wind directions

不同风向角下的湍流度剖面指数( $\alpha$ ),如表 2 所示. 由表 2 可知:受地形和建筑物影响,湍流度剖面指数均大于规范规定的 B 类地表粗糙度指数;山体影响下的湍流度变化最为明显,因此,在研究人行桥桥址风环境变化时,必须考虑地表粗糙的影响.

表 2 不同风向角下的湍流度剖面指数

Tab. 2 Turbulence profile index under different wind directions

$\theta/(^{\circ})$	$\alpha$			$\theta/(^{\circ})$	$\alpha$		
	1/4 桥跨	1/2 桥跨	3/4 桥跨		1/4 桥跨	1/2 桥跨	3/4 桥跨
0	0.232 68	0.234 61	0.230 50	180	0.228 65	0.227 84	0.226 60
45	0.220 44	0.226 88	0.226 37	225	0.212 53	0.216 29	0.223 49
90	0.278 05	0.279 34	0.280 48	270	0.252 23	0.268 00	0.251 69
135	0.185 89	0.187 60	0.196 13	315	0.204 40	0.189 87	0.183 36



## 2 三参数超越阈值概率评估

### 2.1 人行桥风环境评价指标

基于不同的行人风环境评价标准,根据行人步行活动状态进行行人高度风环境评价标准统计,如表 3 所示.表 3 中: $v_{\text{THR}}$  为风速阈值; $P_{\text{exc}}$  为超越阈值概率.行人的步行状态可分为漫步、正常行走、目的性行走 3 类.对桥面行人高度风环境的评价也从 3 类步行状态展开.

利用超越阈值概率法评估桥面人行高度风环境,若满足  $P_{\text{exc}} \leq P_{\text{com}}$ ,  $P_{\text{com}}$  为相应标准中规定的概率值,则认为该区域的行人风环境满足舒适度要求.

基于超越阈值概率的风环境评价方法需要满足 2 个条件:研究区域的风场分布规律和当地常年风向风速统计数据.根据不同风向的风速概率分布确定超越阈值概率计算的相关参数.研究区域的风速概率分布采用 Weibull 分布拟合,确定尺度参数和形状参数以计算  $P_{\text{exc}}$ ,计算式为

$$P_{\text{exc},i}(v > v_{\text{THR}}) = \sum_{i=N}^N A_{\theta_i} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{v_{\text{THR}}}{c_{\theta_i}} \right)^{k_{\theta_i}} \right]. \tag{2}$$

式(2)中: $c_{\theta}$  和  $k_{\theta}$  分别为 Weibull 分布的尺度参数和形状参数; $A_{\theta}$  为该风向角出现的频率.

### 2.2 超越阈值概率的参数估计优化

利用 Weibull 分布对厦门市 59134 气象站点 2011 年 1 月至 2020 年 9 月逐小时风向风速数据进行拟合. Weibull 参数估计结果,如表 4 所示.表 4 中: $v_{\text{mean}}$  为气象平均风速; $\gamma_{\theta}$  为位置参数.

表 4 Weibull 参数估计结果

Tab. 4 Weibull parameter estimation results

风向	$v_{\text{mean}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$A_{\theta}$	两参数 Weibull 分布			三参数 Weibull 分布		
			$c_{\theta}$	$k_{\theta}$	$\gamma_{\theta}$	$c_{\theta}$	$k_{\theta}$	$\gamma_{\theta}$
N	2.903 8	0.055	3.263 8	1.652 4	—	3.263 8	1.652 4	0
NE	3.687 0	0.187	4.157 4	2.211 3	—	4.157 4	2.211 3	0
E	3.173 4	0.092	3.584 5	2.088 8	—	3.584 5	2.088 8	0
SE	2.776 7	0.058	3.136 0	1.862 9	—	3.136 0	1.862 9	0
S	4.188 4	0.148	4.725 0	2.305 4	—	4.725 0	2.305 4	0
SW	5.881 9	0.263	7.860 8	3.221 2	—	8.009 3	3.435 2	−0.796 4
W	6.260 7	0.173	6.316 9	2.978 2	—	6.538 4	3.093 0	−0.203 6
NW	4.173 8	0.024	4.699 6	2.420 0	—	4.699 6	2.420 0	0

由表 4 可知:采用两参数和三参数 Weibull 分布拟合时,SW 和 W 风向下的尺度参数和位置参数不同,其余风向下的尺度参数和位置参数均相同.

表 5 概率分布对比

Tab. 5 Comparison of probability distributions

$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	实际概率分布	两参数 Weibull 拟合概率分布	三参数 Weibull 拟合概率分布
0~3	8.1	4.7	7.7
3~6	34.4	30.3	36.5
6~9	45.2	42.6	44.1
9~12	12.3	18.8	12.1
12~15	0.6	1.2	0.7

位置参数的作用是使拟合函数左右平移,因此,位置参数会影响不同风速的拟合程度.选取 SW 风向对不同平均风速的实际概率分布与两参数 Weibull、三参数 Weibull 拟合概率分布进行对比,结果如表 5 所示.由表 5 可知:利用三参数 Weibull 拟合概率分布值与实际下垫面影响得到的风速概率分布更接近,三参数 Weibull 拟合误差比两参数拟合误差小 38.74%.因此,对 SW 和 W 风向的概率分布采用三参数 Weibull 拟合,以增加行人风环境评估的准确性.

根据该现象引入三参数计算的超越阈值概率  $P_{\text{exc}}$  计算公式<sup>[18]</sup>,即

$$P_{\text{exc},i}(v > v_{\text{THR}}) = \sum_{i=N}^N A_{\theta_i} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{v_{\text{THR}} - \gamma_{\theta_i}}{c_{\theta_i}} \right)^{k_{\theta_i}} \right]. \tag{3}$$

2.3 不同步行状态下的评价结果

因为桥面距离地面最高处为 34.52 m,行人高度距离桥面为 1.75 m,所以桥面行人高度风速需要进行转换.根据指数率风剖面公式,得到桥面行人高度平均风速 $\bar{v}_{\text{ped}}$ 与观测站 10 m 高度平均风速 $v_{10}^{\text{B}}$ 的关系式为

$$v_{10}^{\text{B}} = \left( \frac{10}{36.27} \right)^{0.22} \cdot \bar{v}_{\text{ped}} = 0.753 \cdot \bar{v}_{\text{ped}}. \tag{4}$$

桥址区风速阈值  $v_{\text{THR}}$  与气象站点风速  $v_{O,i,\text{THR}}$  之间的关系式为

$$v_{O,i,\text{THR}} = \frac{0.753}{R_i} \cdot v_{\text{THR}}. \tag{5}$$

将式(5)代入式(2),(3)中,得到该区域全风向风速超越阈值概率,即

$$P_{\text{exc},i}(v > v_{\text{THR}}) = \sum_{i=1}^6 A_{\theta_i} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{v_{O,i,\text{THR}}}{c_{\theta_i}} \right)^{k_{\theta_i}} \right] + \sum_{j=1}^2 A_{\theta_j} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{v_{O,j,\text{THR}} - \gamma_{\theta_j}}{c_{\theta_j}} \right)^{k_{\theta_j}} \right]. \tag{6}$$

针对行人在桥面不同的步行状态,不同评价标准对满足舒适度超越阈值概率的临界值不同,因此,引入超越阈值概率的相对系数  $p$ ,即

$$p = P_{\text{exc},i} / P_{\text{com}}. \tag{7}$$

式(7)中: $P_{\text{exc},i}$ 为测点*i*的全风向超越阈值概率.

将不同评价标准下的各测点全风向超越阈值概率进行统一,其相对系数,如表 6 所示.表 6 中: $p_1 \sim p_9$  分别为测点 1~9 的全风向超越阈值概率的相对系数.由表 6 可知:Isyumov and Davenport 标准对行人舒适度的要求最严格,其余标准的下桥面行人风环境均满足舒适度要求;位于桥面起点和终点附近处的测点 1,2,8,9 的超越阈值概率相对系数较小,这是由于山体地形对风速的阻挡降低了风速比的大小,提高了桥面两端位置处的舒适度;跨中位置处的超越阈值概率约为桥址两端超越阈值概率的两倍,主要原因是跨中位置受街道风加速效应明显,因此,在桥面跨中位置需要防范街道峡谷风给行人带来的不舒适感.

表 6 各测点全风向超越阈值概率的相对系数

Tab. 6 Relative coefficient of all wind direction exceedance probability of each measuring point

步行状态	评价标准	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_7$	$p_8$	$p_9$
漫步	Isyumov and Davenport	1.13	0.44	2.39	2.09	2.82	1.46	2.93	1.24	1.16
	UWO	0.28	0.10	0.61	0.53	0.72	0.37	0.76	0.31	0.29
正常行走	Isyumov and Davenport	0.41	0.12	0.94	0.83	1.14	0.54	1.26	0.44	0.39
	Lawson and Penwarden	0.03	0.01	0.08	0.07	0.11	0.04	0.12	0.03	0.02
	CSTB	0.37	0.18	0.71	0.62	0.80	0.46	0.82	0.40	0.38
	NEN8100	0.31	0.17	0.54	0.48	0.60	0.37	0.61	0.33	0.31
目的性行走	CSTB	0.18	0.09	0.35	0.31	0.40	0.23	0.41	0.20	0.19
	UWO	0.12	0.03	0.27	0.23	0.33	0.15	0.36	0.12	0.11

3 结论

利用风洞试验研究复杂下垫面影响的桥址区行人风环境,并利用三参数超越阈值概率对行人舒适度进行评价,得到以下 3 个结论.

- 1) 下垫面改变了桥址区的地表类型,试验得到的风速和湍流度剖面指数均大于规范规定的 C 类地表值;行人风速比受不同下垫面影响,表现出街道峡谷风加速、建筑物拖曳作用和山体减速效应明显.
- 2) 三参数 Weibull 分布拟合结果与真实下垫面中气象站点得到的风速概率分布相接近,相比两参数 Weibull 分布,其拟合误差减小了 38.74%.
- 3) 城市下垫面中山体的遮挡效应导致风速减小,增加了行人在山脚处的步行舒适度;受城市街道

风加速效应影响,桥面跨中处超越阈值概率约为桥址起点和终点值的两倍.在实际工程建设中,需要防范桥面跨中处可能引发的行人风环境不舒适感,可以通过在桥面跨中位置设计挡风屏障降低行人风环境不舒适感.

参考文献:

[1] 陈德江,石碧青,谢壮宁.某高层建筑风环境风洞试验研究[J].汕头大学学报(自然科学版),2002,17(1):74-80. DOI:10.3969/j.issn.1001-4217.2002.01.015.

[2] 马文勇,刘庆宽,刘小兵,等.群体高层建筑行人区域风环境试验研究[J].工程力学,2013,30(增刊1):304-308. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.S050.

[3] 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. DOI:10.3969/j.issn.1673-7644.2010.01.006.

[4] 唐春朝,韩艳,沈炼,等.邻近高耸建筑对小区风环境的影响试验研究[J/OL].土木与环境工程学报(中英文)(2020-09-08)[2020-12-24]. <https://doi.org/10.11835/j.issn.2096-6717.2020.127>.

[5] 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. DOI:10.13245/j.hust.2011.10.002.

[6] 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. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2011.03.0106.

[7] 陈伏彬,李秋胜,吴立.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[J].工程力学,2015,32(10):169-176. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2014.09.0751.

[8] 郑朝荣,陈勇,金钊,等.基于超越阈值概率的某千米级摩天大楼室外平台行人风环境评估[J].建筑结构学报,2018,39(2):122-129. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.02.014.

[9] 郑朝荣,王洪礼,李胤松,等.某摩天大楼室外平台行人风环境数值研究[J].工程力学,2018,35(1):118-125. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2016.08.0649.

[10] 杨立国,严亚林,李宏海.某滑雪场复杂山地地形风场的风洞试验与数值模拟研究[J].建筑结构,2020,50(11):135-140. DOI:10.19701/j.jzjg.2020.11.024.

[11] 郝晓乐,雷晓波,雷蒂远,等.三参数威布尔分布参数估算方法对比研究[J].机械研究与应用,2017,30(2):1-4. DOI:10.16576/j.cnki.1007-4414.2017.02.001.

[12] 南东雷,贾志新,李威.三参数威布尔分布的蒙特卡洛点估计方法[J].机械设计与制造,2017(1):142-144,148. DOI:10.3969/j.issn.1001-3997.2017.01.038.

[13] 董胜,韩意,陶山山,等.Weibull分布参数的粒子群算法估计[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2012,42(6):120-125. DOI:10.3969/j.issn.1672-5174.2012.06.019.

[14] 范英,王顺坤,晋民杰.多种数据状态下三参数 Weibull 分布的极大似然估计[J].机械强度,2012,34(1):53-57. DOI:10.16579/j.issn.1001.9669.2012.01.001.

[15] BLOCKEN B, STATHOPOULOS T, VAN BEECK J P A J. Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment[J]. Building and Environment, 2016, 100: 50-81. DOI:10.1016/j.buildenv.2016.02.004.

[16] HUNT J C R, POULTON E C, MUMFORD J C. The effects of wind on people: New criteria based on wind tunnel experiments[J]. Building and Environment, 1976, 11(1): 15-28. DOI:10.1016/0360-1323(76)90015-9.

[17] BLOCKEN B, JANSSEN W D, VAN HOOFF T. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus[J]. Environmental Modelling and Software, 2012, 30: 15-34. DOI:10.1016/j.envsoft.2011.11.009.

[18] KIKUMOTO H, CHOI W, OOKA R. Development of probabilistic assessment framework for pedestrian wind environment using Bayesian technique[J]. Building and Environment, 2021, 187: 107419. DOI:10.1016/j.buildenv.2020.107419.

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 方德平)