

文章编号: 1008-2786-(2019)1-041-12

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000397

山地地形对鼓浪屿历史文化街区风荷载作用效应研究

任兰红¹, 曾 坚^{1*}, 曾德平^{2,3}

(1. 天津大学 建筑学院, 天津 300072; 2. 天津城建大学 建筑学院, 天津 300384;
3. 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092)

摘 要: 山地环境中的街区风荷载与平地条件下有明显不同。鼓浪屿历史文化街区处于台风易发地区, 对其开展山地环境下风荷载作用效应的研究对科学保护历史建筑非常必要。本文以鼓浪屿历史文化街区为研究对象, 运用 ANSYS Fluent 进行数值分析山地地形对鼓浪屿风场与风荷载体型系数的影响并提出对该地区已有建筑防风保护与建筑选址的建议。表明: (1) 鼓浪屿的高风速、极值加速比、极值负压和极值风荷载体型系数均集中分布在成十字相交的两轴线的各山顶, 两轴线是核心线性防风区域, 龙头山、鸡母山和笔架山山顶为防风重点。(2) 龙头山山顶近地面处加速比最大, 对应产生极值风荷载体型系数。(3) 两轴线的横风向加速比均大于顺风向, 山顶加速效应大于峡谷侧面大于峡谷底处。(4) 山顶处数值模拟得到的风荷载体型系数与规范值差距不大, 峡谷处由规范得出的修正系数较数值模拟值偏小。(5) 海拔较低的迎风面和背风面山脚风速低, 适合建筑选址。龙头山、鸡母山和笔架山山顶区为高风速频发且极值负压产生的区域, 是加强建筑检修与维护、提高防风性能的重点, 不宜作为建设选址。

关键词: 鼓浪屿历史文化街区; 山地地形; 风速; 风压; 风荷载体型系数; CFD 风环境数值模拟

中图分类号: TU312

文献标志码: A

厦门位于武夷山脉与台湾中央山脉之间的狭促地带, 是台风灾害易发的区域之一。鼓浪屿位于厦门本岛西南, 北纬 $N24^{\circ}26'55.25''$ 东经 $E118^{\circ}03'43.55''$, 是一个由数个山丘构成的岛屿, 岛上有 391 幢历史风貌建筑, 多为二十世纪二、三十年代建造, 以 1~3 层低矮砖木结构为主^[1]。2016 年 9 月 15 日, 新中国成立以来最强台风“莫兰蒂”在厦门登陆, 致使鼓浪屿历史文化街区受到严重破坏: 10 多处重点保护建筑受到破坏; 处于山顶的毓德女校的三落姑娘楼的屋面破损、两根壁柱和玻璃窗倾倒, 受

损最严重; 其他一般保护历史风貌建筑有 21 栋建筑屋面或院墙轻微受损。鼓浪屿历史文化街区年代久远, 当前对其关注多考虑规划与建筑保护, 对风场与风荷载方面的研究少有涉及。山地环境中的建筑风荷载与平地相比有明显差异^[2], 因此对台风易发地区的山地环境下的鼓浪屿历史文化街区风荷载作用效应的研究非常必要。

《建筑结构荷载规范》(GB5009—2012) 对山地风荷载体型系数的修正是山地风荷载研究的基础, 但是以单一山体为基础, 不适应复杂山地^[3-4]。近

收稿日期 (Received date): 2018-03-03; **改回日期** (Accepted date): 2019-01-27

基金项目 (Foundation item): 国家“十三五”重点研发计划(2016YFC0502903); 国家自然科学基金(51438009, 51708387); 教育部人文社科基金(17YJCZH013)。[National Key Research and Development Program of China for the 13th Five-year Plan Period (2016YFC0502903); National Nature Science Foundation of China (51438009, 51708387); Ministry of Education of Humanities and Social Science Foundation (17YJCZH013)]

作者简介 (Biography): 任兰红(1986-), 女, 山东临沂人, 博士生, 主要研究方向: 建筑风环境。[REN Lanqing(1986-), female, born in Linyi, Shandong province, Ph. D. candidate, specialized in wind environment of architecture] E-mail: qlyy222@126.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 曾坚(1957-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 生态城市与防灾减灾。[ZENG Jian(1957-), male, Ph. D. professor, specialized in ecological city and disaster prevention and mitigation] E-mail: 13602058416@vip.163.com

年来,对复杂山地风荷载的研究可通过现场实测、风洞试验或 CFD(计算流体力学,Computational Fluid Dynamics)数值模拟实现^[5-8],其中 CFD 数值模拟方法以易操作、可控制与低成本的优点在风场与风荷载特性的研究中得到广泛应用^[9-10]。山体风场的研究对象由单一山体发展到复杂山体,通过风洞试验或数值模拟得到平均风速与脉动风速模型,认为山顶平均风速加速效应与背风山脚减速效应均最大,且与坡度成正比^[11],复杂山体的山顶近地面平均风速的最大加速比与遮挡山体坡度成正比,与山体间距成反比^[12]。由于高耸的构筑物对风荷载作用相应十分敏感,因此,早期对山地风荷载的研究多关注高层和超高层建筑风荷载特性,通过对比平地与山地的高层位移响应,发现后者增大比例最大可至 20%^[13],方形截面超高层平均阻力系数增大,均方根升力系数明显减小,而截面为圆形时与高宽比无关。近几年对山地低矮建筑风荷载特性受到广泛关注,探究单一山体或单一峡谷的风速、风向角、地形走势和山间距离等因素对低矮建筑风荷载的影响并提出建筑选址建议^[14],但是没有涉及数个山体的复杂地形条件下的低矮建筑风荷载的探讨。因此,本文基于 CFD 数值模拟方法,结合《建筑结构荷载规范》(GB5009—2012)的基本规定对数个山体的复杂地形环境下的鼓浪屿低矮建筑风荷载的作用效应进行研究,从而为台风灾害防控提供基础。

1 相关释义

1.1 基本风速与加速比

基本风速是根据我国《建筑结构荷载规范》(GB5009—2012)的要求,C 类标准地貌及开阔平地条件下,在距地面 10 m 的位置,统计获取的某一地区 50 年一遇的 10 min 最大平均风速。为了定量分析加速效应的大小,定义加速比为:

$$S = \frac{u(z)}{u_0(z)} \quad (1)$$

式中, $u(z)$ —距离山地地面 z 高度处的风速;

$u_0(z)$ —距离平地 z 高度处的风速。

1.2 风压与风压系数

风压是与气流方向垂直的每平方米的面受到的风的压力,单位为 kN/m^2 。风压 W_p 与风速 V_0 的计算式为:

$$W_p = V_0^2/1600 \quad (2)$$

风压系数是衡量一个建筑型体对风压分布的影响的无量纲常数,即建筑表面各测点的风压和来流参考高度没有经过建筑干扰的风压之比,表达式如下:

$$C_p(t) = \frac{p(t) - p_0}{0.5\rho U_H^2} \quad (3)$$

式中, $p(t)$ —气流经过建筑时,建筑表面风压;

p_0 —参考静压;

ρ —空气密度,通常是 1.225 kg/m^3 ;

U_H —未被干扰的参考高度位置,通常为建筑檐口高度处来流的 10 min 以内的基本风速。

1.3 风荷载体型系数与影响因子

我国规范通过体型系数反映气流对建筑物风压的影响,是建筑物表面风压值除以该点前方未受扰动的风压、经无量化得到的风压系数在面积上的加权平均。

$$\mu_s = \frac{\sum_i \mu_{si} A_i}{A} \quad (4)$$

式中, μ_s —风荷载体型系数;

μ_{si} —建筑表面第 i 点的风压系数;

A_i —第 i 点占有的建筑面积;

A —所计算的建筑表面的总面积, $A = \sum_i A_i$ 。

山地风场体型系数影响因子是山地风场中计算、实测或风洞试验得到的体型系数与《建筑结构荷载规范》计算得出的山地风场中的体型系数的比值。

$$\beta = \frac{\mu_{s0}}{\mu_s} \quad (5)$$

式中, β —山地风场体型系数影响因子;

μ_{s0} —山地风场中计算、实测或风洞试验得到的体型系数;

μ_s —《建筑结构荷载规范》计算得出的山地风场中的体型系数。

屋面是风灾中易损部位,通常由于极值负压在屋面产生强大的背离屋面的吸力。因此反映屋面风压分布的无量纲常数风压系数(极值)是风荷载分析的重要参数。风压系数是某一局部受到风的作用大小的反映,风荷载体型系数是反映某个面受到风作用力的大小,两者呈正相关。未受到物体干扰的

气流的风压与风速呈正相关,但建筑表面的风压系数与风荷载体型系数的绝对值较大时对应的风速大小均有可能,可通过数值模拟进行确定。

1.4 CFD 风环境数值模拟软件与条件设置

CFD 数值模拟基于湍流模型,在网格划分、边界条件设定后,可对简化的流体力学方程进行有限元分析与求解,从而获得气流流动的形态与受到气流干扰的物体表面的荷载等物理量(平均风速、风压与风压系数等)。

(1) 模型选取

ANSYS 软件是当下应用非常广泛的 CFD 求解器之一,本文研究基于 ANSYS fluent17.0 研究山地地形对鼓浪屿历史文化街区风荷载作用效应的影响。本文选用 $RNGk-\varepsilon$ 湍流模型,此模型通过修正湍流黏度,并且考虑平均流动中的旋转以及旋流流动可以更好地处理高应变率以及流线弯曲度较大的流动,进而使得数值模拟的结果更加准确。 $RNGk-\varepsilon$ 湍流模型对建筑风场研究的适用性已经被多位学者^[15]验证,其流体控制微分方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \eta_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \eta_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \\ &+ \frac{G_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: k 为湍流动能; ε 为湍流耗散率; $\eta_{eff} = \eta + \eta_t$, $\eta_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}$ 为湍动黏度; C_μ 、 $D_{1\varepsilon}^*$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 α_k 和 α_ε 均为湍流模型的经验系数; G_k 为由于平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项。

(2) 计算域与网格设置

计算域高度取 4 倍研究对象的高度,长度、宽度

均为研究对象边长的 6 倍,山体位于流域前 1/3 处,所有模型控制阻塞比不超过 3%。该计算区域的网格划分采用非结构化四面体网格,对山地模型附近进行加密,以外区域网格逐渐稀疏。

(3) 边界条件设置

地面粗糙度选 B 类地区,为 0.16;来流入口边界条件采用速度入口,出口边界条件采用完全发展的出流边界条件,残差小于 10^{-4} 作为收敛判断标准。

2 山地地形对风场及风荷载体型系数的影响

(1) 山地地形对风速、风压的影响

山地对建筑风场的影响主要包括:一,山体使气流产生加速或减速效应,如山脚处气流受到阻挡有一定减速;山腰处,气流被抬升使得风速增大;至山顶处达到最大加速^[16-17](图 1(a));峡谷走势与风向夹角较小时产生狭管效应导致风速增大(图 1(b))。二,山地对建筑周围风压产生影响,如山顶处形成极值负压区、迎风面形成极值正压区(图 1(a)),使风场复杂化^[18]。

为了研究不同坡度的山体对风速与风压的影响,选取余弦山体模型作为 CFD 数值模拟的理想模型,以山体底面所在的面为 XOY 坐标面,中心为原点,风向为 X 轴正方向,设定初始风速 5 m/s。控制山体高度 h 为定量 100 m,设置山顶至 $h/2$ 高度处的水平距离 L_1 分别为 250、200、150 与 100 m,分别对应 4 种山体坡度(图 2, $i = h/2L_1$)。对比图 3 不同坡度山体风场的风速与风压可知:迎风面山脚风速变化不大,局部出现正压,与山体坡度成正比;山顶处风速与加速效应最大,产生最小负压,风速与风压绝对值与山体高度和坡度成正比^[19]。山顶后由

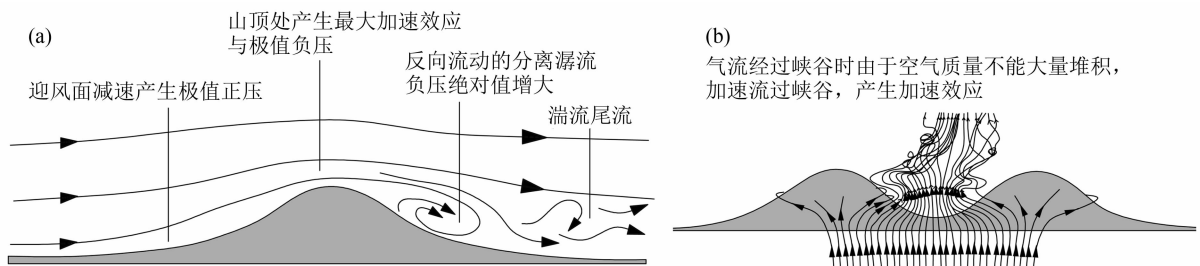


图 1 越山风示意图(a)^[16]和峡谷风示意图(b)

Fig. 1 Schematic diagram of wind crossing mountain (a); and wind through valley (b)

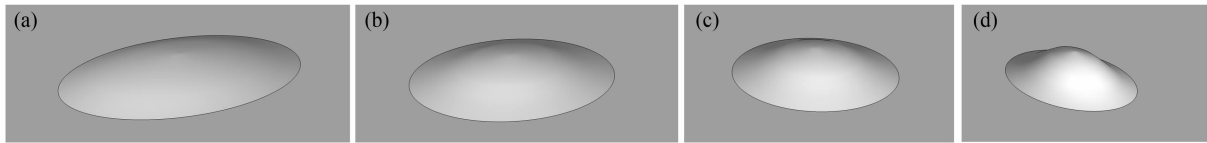
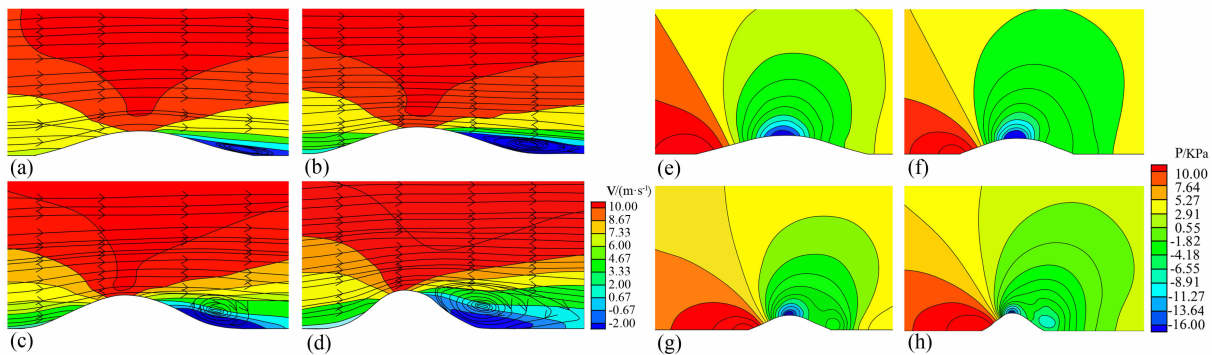


图2 不同坡度的山体模型

(a) $h = 100, L_1 = 250, i = 0.20$, (b) $h = 100, L_1 = 200, i = 0.25$, (c) $h = 100, L_1 = 150, i = 0.33$, (d) $h = 100, L_1 = 100, i = 0.50$.

Fig. 2 Mountain models with different slopes

(a) $h = 100, L_1 = 250, i = 0.20$, (b) $h = 100, L_1 = 200, i = 0.25$, (c) $h = 100, L_1 = 150, i = 0.33$, (d) $h = 100, L_1 = 100, i = 0.50$.

图3 不同坡度山体的风速(a)(b)(c)(d)与风压(e)(f)(g)(h)^[20]

(a)和(e)、(b)和(f)、(c)和(g)、(d)和(h)对应图2中(a)(b)(c)(d)的坡度。

Fig. 3 Wind speed (a)(b)(c)(d) and pressure (e)(f)(g)(h) affected by mountains with different slopes^[20]

(a) and (e), (b) and (f), (c) and (g), (d) and (h) correspond to the slopes of (a)(b)(c)(d) in Fig. 2.

于截面突然放大,形成局部负压,产生逆行旋涡,涡流高度及负压强度与山体高度和坡度成正比^[20],不利于防风。山脚处风速降低程度最大,降低效率与山体高度和坡度成正比。

(2) 山地地形对风荷载体型系数的影响

受到山体迎风面产生的正压的作用,双坡屋面的风荷载体型系数在山体迎风面坡度较小时已变成正值。迎风面山腰处风速增大而导致风荷载体型系数绝对值增大,且与坡度成正比。由于风速增加以及山体形成的负压的共同作用山顶处风荷载体型系数绝对值最大。山地背风面风荷载为负压吸力,旋涡区风荷载体型系数绝对值增大,与坡度成正比^[20]。

3 山地地形对鼓浪屿风场与风荷载体型系数的影响

3.1 鼓浪屿地形与模型概况

鼓浪屿由数个山体组成,各山体海拔与模型见图4,鼓浪屿模型长、宽分别为1770 m和1158 m,面

积1.87 km²。最高峰龙头山海拔93 m,位于中部偏南。龙头山与其南北的英雄山、鸡母山、笔架山与燕尾山以及龙头山东西的升旗山、鸡冠山与浪洞山共同形成十字相交的中间高、南北和东西逐渐降低的地势。

3.2 参数设定

(1) 风向

已有学者对从厦门登录的台风的风向进行实测得出偏北与偏东方向是厦门地区台风主要风向^[21]。因此确定鼓浪屿风荷载数值模拟的风向为NNE22.5°与ENE67.5°。

(2) 风速

根据气象统计得出超强台风(风速 ≥ 51.0 m/s)在登录台风中占比例最大,因此选择超强台风的基本风速51.0 m/s作为数值模拟的风速。

3.3 风速与加速比分析

(1) 山顶风速与加速比分析

结合图5可知多种风向下高风速区集中在成十字相交的“燕尾山—笔架山—鸡母山—英雄山”与“浪洞山—鸡母山—龙头山—升旗山”的各山顶。

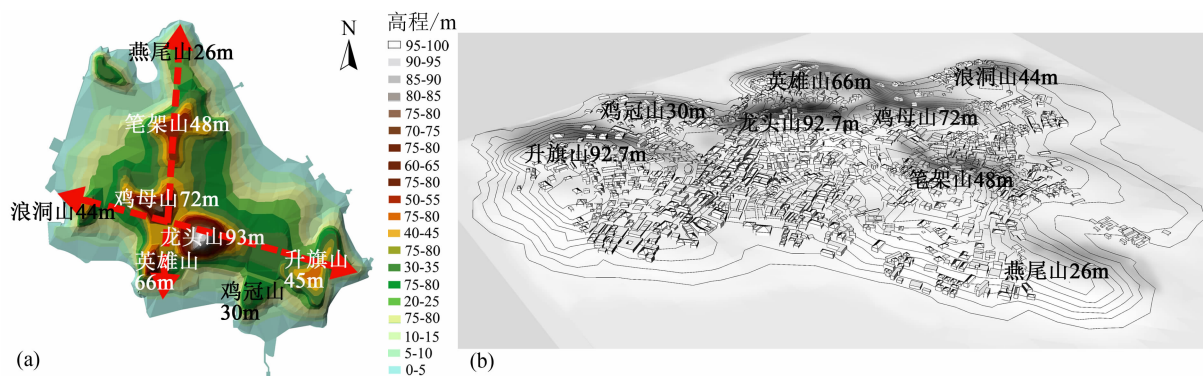


图4 鼓浪屿历史文化街区地形(a)与模型(b)

Fig. 4 Terrain (a) and model (b) of Kulangsu historical cultural district

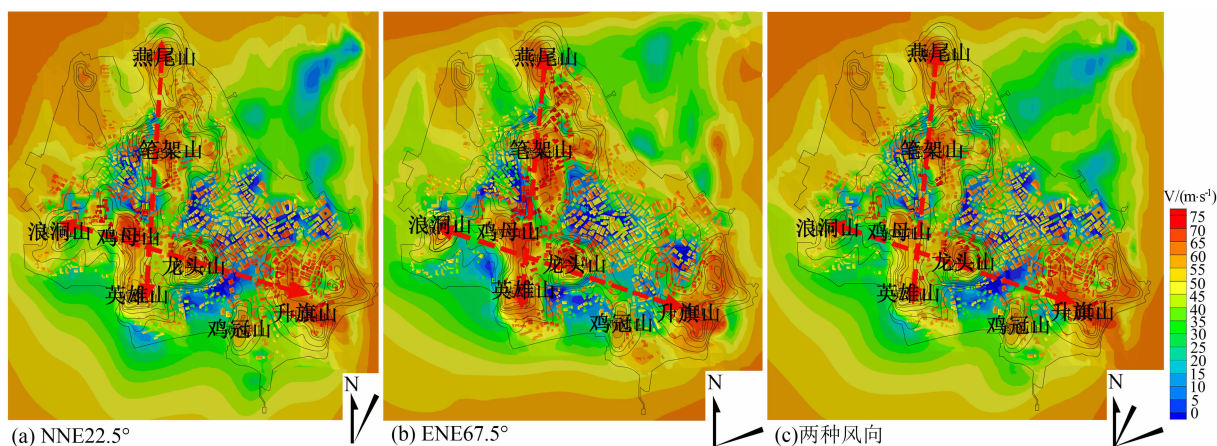


图5 NNE22.5°(a)、ENE67.5°(b)和两种风向(c)下鼓浪屿风速

Fig. 5 Wind speed of Kulangsu effected by wind of NNE22.5°(a), ENE67.5°(b) and two directions (c)

低风速区分布于山体的背风区域。海拔较低的迎风面和背风面山脚风速较小。以下对鼓浪屿加速效应最大的各山顶距离地面 100 m 高度内(研究对象为多层建筑,高度低于 100 m)的风速与加速比进行对比分析。

在不同风向下,影响风速与加速比的因素主要是山体高度和山体位置。所有山顶临近地面时加速比最大,高度增大时,加速效应逐步降低趋近于 1。结合图 6 可知 NNE22.5° 风向时,较高风速与加速比的山体依次为:龙头山、鸡母山、浪洞山和升旗山,四者山顶连线与风向垂直。最高山峰龙头山山顶风速与加速比均最大;其次是高度居第二的鸡母山。其余四者由于山体高度较低或位于峡谷尾流区,产生较小风速,如英雄山位于鸡母山和龙头山峡谷的尾流区,由于峡谷尾流区风速会降低^[22],因此笔架山山顶风速与加速比均比英雄山大。高度最低的燕尾山风速最小,最小加速比为 1.011。

结合图 7 可知 ENE67.5° 风向时,较高风速与加速比的山体依次为:龙头山、笔架山、鸡母山和英雄山,四者山顶连线与风向垂直。与 NNE22.5° 风向一致,最高山峰龙头山山顶的风速与加速比均最大,最大加速比为 2.75;其次是笔架山,虽然笔架山高度低于鸡母山和英雄山,由于鸡母山位于峡谷效应的尾流区,英雄山受到最高的龙头山风影区影响,两者风速均低于笔架山。其余四者由于高度较低,风速与加速比均较小,浪洞山位于鸡母山下风向,风速与加速比均最低,最小加速比为 1.008。

由图 8 可知,两种风向同时作用时龙头山山顶风速与加速比均最大,最大加速比为 2.94,位于上风向的升旗山、笔架山与燕尾山山顶风速与加速比均大于下风向的鸡母山、英雄山、鸡冠山与浪洞山。对上述两种风向下各山顶的加速比与距离山顶地面高度之间的关系曲线进行拟合,为建筑风荷载计算提供基础(表 1)。

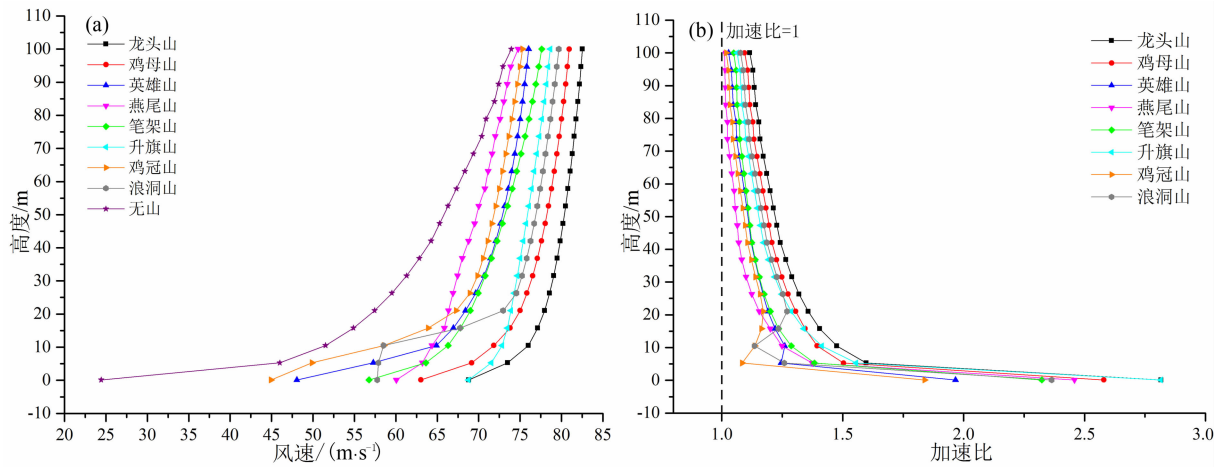


图6 NNE22.5°风向下各山顶风速(a)与加速比(b)

Fig. 6 Wind speed (a) and acceleration ratio (b) of different hilltops in NNE22.5° wind

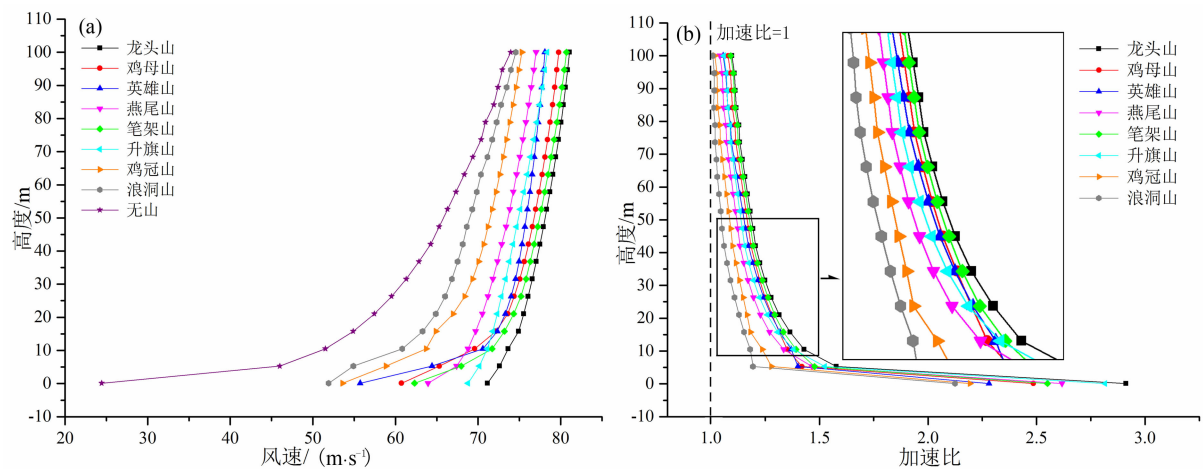


图7 ENE67.5°风向下各山顶风速(a)与加速比(b)

Fig. 7 Wind speed (a) and acceleration ratio (b) of different hilltops in ENE67.5° wind

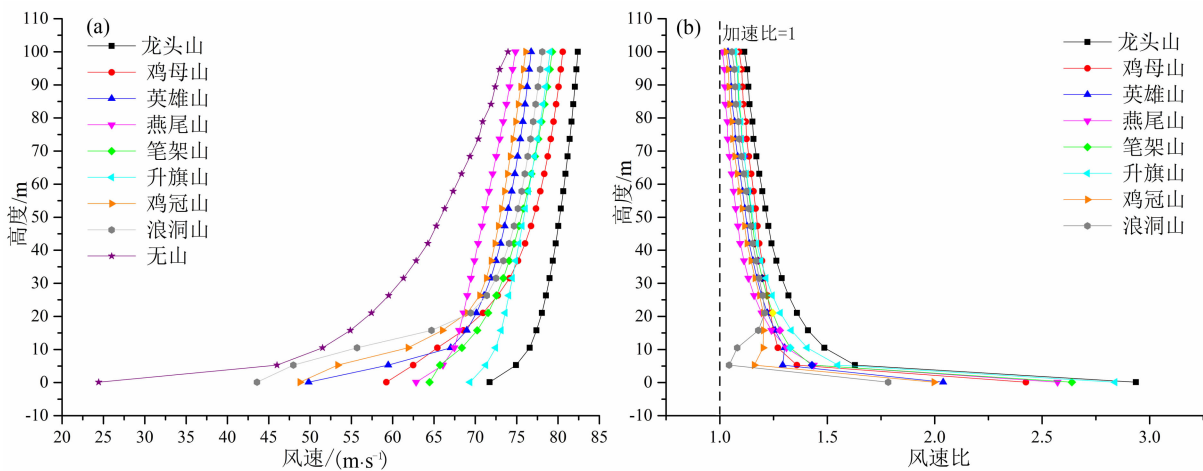


图8 两种风向作用下各山顶风速(a)与加速比(b)

Fig. 8 Wind speed (a) and acceleration ratio (b) of different hilltops effected by wind from two directions

表 1 各山顶加速比与距离山顶地面高度的拟合曲线

Tab1. Curve fitting of different hilltops' wind acceleration ratio and height from hilltops' ground

山体	拟合公式			R^2			F 的 p 值
	22.5°风向	67.5°风向	两种风向	22.5°风向	67.5°风向	两种风向	
龙头山	$y = 2.13 - 0.23\ln x$	$y = 2.16 - 0.25\ln x$	$y = 2.29 - 0.25\ln x$	0.97	0.95	0.96	0.00
鸡母山	$y = 1.97 - 0.20\ln x$	$y = 1.91 - 0.19\ln x$	$y = 1.84 - 0.18\ln x$	0.96	0.95	0.91	
英雄山	$y = 1.60 - 0.13\ln x$	$y = 1.81 - 0.17\ln x$	$y = 1.65 - 0.14\ln x$	0.96	0.98	0.97	
燕尾山	$y = 1.84 - 0.20\ln x$	$y = 1.96 - 0.22\ln x$	$y = 1.93 - 0.22\ln x$	0.94	0.95	0.95	
笔架山	$y = 1.79 - 0.17\ln x$	$y = 1.96 - 0.20\ln x$	$y = 1.97 - 0.21\ln x$	0.95	0.96	0.93	
升旗山	$y = 2.10 - 0.25\ln x$	$y = 2.08 - 0.24\ln x$	$y = 2.11 - 0.24\ln x$	0.96	0.95	0.95	
鸡冠山	$y = 1.48 - 1.40\ln x$	$y = 1.70 - 0.16\ln x$	$y = 1.59 - 0.13\ln x$	0.86	0.94	0.90	
浪洞山	$y = 2.13 - 0.23\ln x$	$y = 1.63 - 0.15\ln x$	$y = 1.45 - 0.09\ln x$	0.86	0.92	0.72	

注： R^2 是度量回归方程对数据的拟合程度的统计量，最大值为 1，越接近 1，拟合程度越好； F 是判断因变量与各自变量的关系在总体上是否显著，对应的 p 值均为 $0.00 < 0.01$ ，则模型显著。

(2) 过山轴线顺、横风切面加速比分析

沿图 5 中十字相交的山体轴线均匀布点，求山体轴线各测点在 NNE22.5° 和 ENE67.5° 两种风向下近地面高度处的顺、横风切面加速比(图 9)，结合山体轴线剖面可得：①两处山体轴线切面的横风向加速比均大于顺风向，是由于顺风向山体轴线切面是山体的迎风面和背风面，而横风向山体轴线切面是侧风面，背风面风速降低，迎风面的加速效应低于侧风面^[18]。②加速比与山体高度成正比，其分布与山体轴线剖面基本一致。③产生峡谷效应的加速比由山顶至峡谷底部逐渐降低，可知山顶加速效应大于峡谷侧风面大于峡谷底处。

3.4 风压分析

基于多种风向条件下的风压系数分布(图 10)，对风压系数绝对值由大到小排序得到较大风压系数绝对值区域共 5 处，结合上述风速和加速比分布特征对风压特征进行分析。

多种风向下极值负压系数分布与上述高风速线

性集聚区两轴线吻合，即产生较高加速比的各山体所在轴线对应形成极值负压轴线(图 10 中①和④、②和③)。NNE22.5° 风向时，“燕尾山—笔架山—鸡母山—英雄山”为顺风切面，且为缓坡，气流缓慢被抬升，分离强度弱，因此轴线上只有最高的鸡母山产生极值负压系数；“浪洞山—鸡母山—龙头山—升旗山”为横风切面，山体之间为侧风面，且为陡坡，加速比较大，气流分离强度高，因此此轴线①④和⑤区域产生线性极值负压区。ENE67.5° 风向时，“燕尾山—笔架山—鸡母山—英雄山”为横风切面，加速效应明显，因此产生连续的线性极值负压区①②和③；“浪洞山—鸡母山—龙头山—升旗山”为顺风切面，由于龙头山和升旗山高度和坡度较大，连同其西南侧的鸡冠山形成点状极值负压区。两种风向同时作用时，整体风压系数绝对值较小，仅在最高的龙头山顶产生绝对值低于单一风向条件下的负压系数。

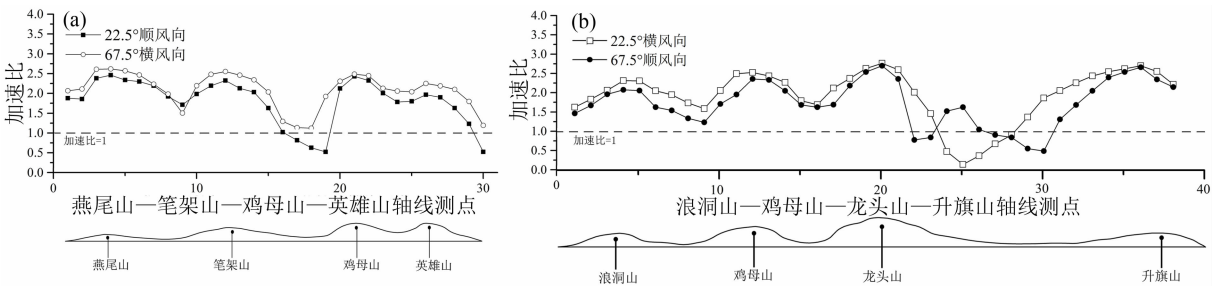


图 9 过山轴线顺、横风切面加速比

Fig. 9 Wind acceleration ratio of cross-wind and along-wind plane

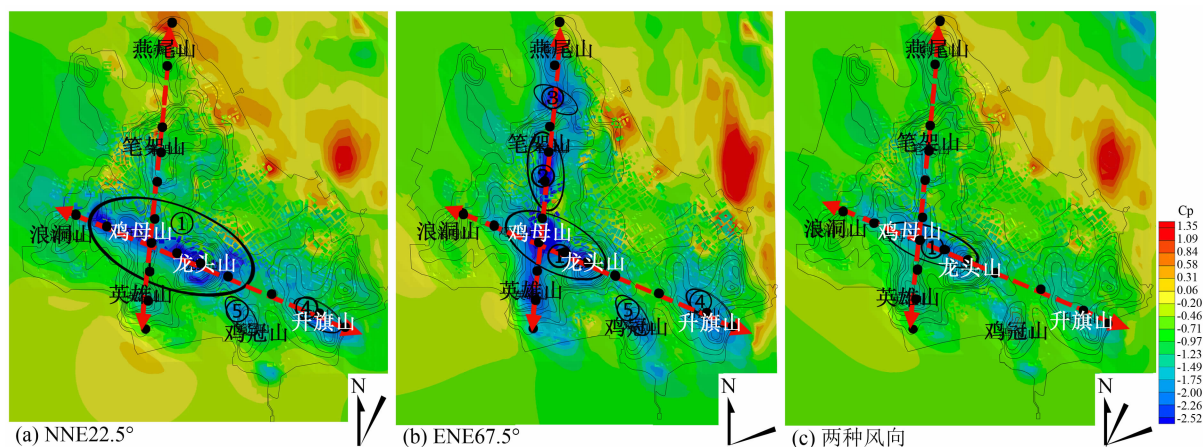


图 10 NNE22.5°(a)、ENE67.5°(b)和两种风向作用(c)下鼓浪屿风压系数

Fig. 10 Wind pressure coefficient of Kulangsu effected by wind of NNE22.5°(a), ENE67.5°(b) and two directions (c)

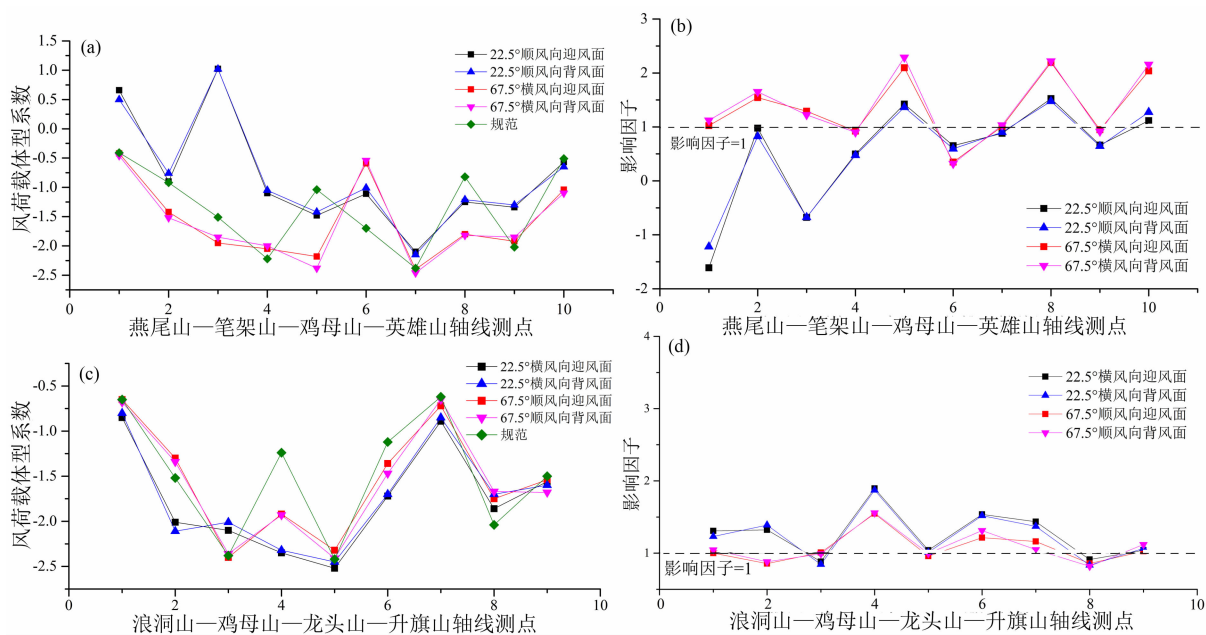


图 11 两种风向下过山轴线顺、横风切面风荷载体型系数(a)(c)与影响因子(b)(d)

Fig. 11 Wind load shape coefficients (a)(c) and impact factor (b)(d) of cross-wind and along-wind plane effected by two wind directions

3.5 风荷载体型系数与影响因子分析

沿图 10 中十字相交的山体轴线选取山体典型位置处的建筑作为风荷载体型系数研究的对象(图 10 测点),求十字相交的山体轴线上两种风向下建筑风荷载体型系数和山地风场体型系数影响因子(图 11、图 12),对比按《建筑结构荷载规范》(GB5009—2012)求得的规范体型系数可得:

(1)迎风面与背风面风荷载体型系数基本一致,差异很小。NNE22.5°与 ENE67.5°风向时两个轴线的横风向体型系数绝对值大于顺风向体型系数

绝对值,与上述分析的横风向条件下的风速、风速比和风压系数绝对值在整体上均大于顺风向一致。

(2)“燕尾山—笔架山—鸡母山—英雄山”NNE22.5°顺风向条件下,由于此轴线由北至南为缓坡,整体轴线上体型系数绝对值较小,利于防风。此轴线在 ENE67.5°横风向条件下,于鸡母山山顶处体型系数绝对值最大(测点 7),为 -2.4,而影响因子为 1(同样测点 4 为鸡母山山顶影响因子也接近 1,另外一山体轴线亦同),即山顶处计算值与规范值差距不大。影响因子最值多位于峡谷(测点 5 和 8

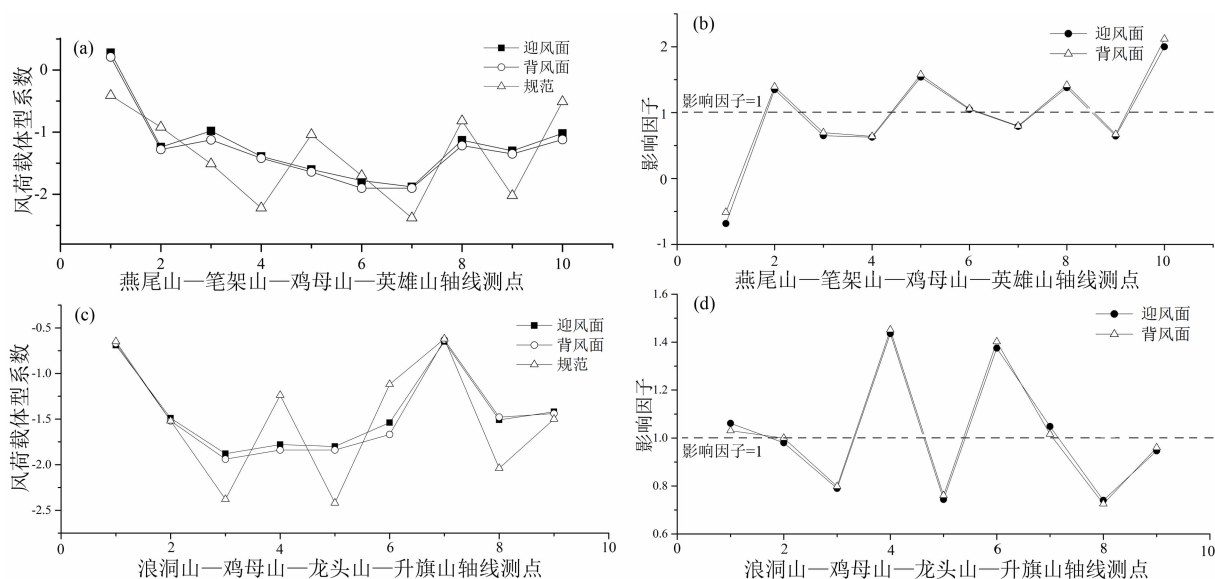


图 12 两种风向作用下两轴线风荷载体型系数 (a) (c) 与影响因子 (b) (d)

Fig. 12 Wind load shape coefficients (a) (c) and impact factor (b) (d) of two axes effected by two wind directions

处体型系数分别为规范值的 2.89 和 2.22 倍,前者为所有测点影响因子的最大值),可知由于峡谷处地势较低,风荷载规范中的山地风荷载修正系数以坡度与高度为参考因素,没有涉及复杂地形条件时峡谷风场的复杂性(如负压旋涡)而导致修正系数偏小。

(3)“浪洞山—鸡母山—龙头山—升旗山”在 NNE22.5°横风向条件下,于龙头山山顶处体型系数绝对值最大,为 -2.52(测点 5),影响因子为 1.04。NNE22.5°和 ENE67.5°风向下最大影响因子均为鸡母山和龙头山之间的峡谷(测点 4),分别为 1.90 和 1.55。

(4)两种风向同时作用时风荷载体型系数绝对值较小,但是在两山体之间的峡谷处数值模拟的风荷载体型系数绝对值大于规范计算值,如南北轴线的测点 2、5、8,东西轴线的测点 4 和 6,最大影响因子为 1.58(测点 5)。

4 讨论

(1)山体高度是影响风荷载体型系数的重要因素之一,山顶位置风速加速比最大,且山体自身产生的极值负压绝对值最大,在两重因素叠加下建筑体型系数绝对值显著增大。在山体高度一定时,当风向与缓坡平行时,风荷载体型系数较低,利于防风,

如“燕尾山—笔架山—鸡母山—英雄山”NNE22.5°顺风切面仅在最高鸡母山山顶产生极值,但是当风向垂直于其东侧的陡坡时,此轴线上多个缓坡处风荷载体型系数绝对值增大。

(2)复杂山体地形各山顶轴线切面的风速、加速比、风压和体型系数与轴线和风向之间的夹角密切相关,在山地因素(高度、坡度、山体间距等)一定时,顺风向与横风向风场切面通常差异较大(如顺风向缓坡和横风向陡坡),是由于风向和山体迎风面、背风面和峡谷加速效应的共同作用而导致风速、风压的不同。

(3)复杂山体地形对风荷载的影响主要是依据规范得出的山体之间的建筑风荷载修正系数偏小。《建筑结构荷载规范》(GB5009—2012)对山地建筑风荷载的修正是增加修正系数,修正系数以山顶为最大值至山脚线性插入,设定山脚处修正系数为 1,适用于单一山体的条件,对于多个山体组合的地形,由于没有涉及山体之间的复杂风场(如负压旋涡等)而导致计算体型系数与规范有差异,因此对于复杂地形的体型系数应进行数值计算或风洞试验进行求解。

5 结论

山体对风场的影响主要包括对风速与山体周围

气压的改变,通过对鼓浪屿历史文化街区的风场与风荷载体型系数的数值模拟与分析得出:

(1)鼓浪屿的高风速区集中在成十字相交的“燕尾山—笔架山—鸡母山—英雄山”与“浪洞山—鸡母山—龙头山—升旗山”两轴线的各山顶。多种风向下加速比最大值是龙头山近地面处,为 2.94;山顶最小加速比位于多个山体下风向的浪洞山山顶,为 1.008。

(2)“燕尾山—笔架山—鸡母山—英雄山”和“浪洞山—鸡母山—龙头山—升旗山”两轴线切面的横风向加速比均大于顺风向;加速比与山体高度成正比,其分布与山体轴线剖面一致;山顶加速效应大于峡谷侧风面大于峡谷底处。

(3)两轴线的横风向体型系数绝对值大于顺风向,与横风向条件下的风速、风速比和风压绝对值在整体上均大于顺风向一致。NNE22.5°横风向条件下龙头山山顶处体型系数绝对值最大,为 -2.52。多种风向下山顶处计算体型系数与规范值差距不大,由风荷载规范得到的峡谷位置的风荷载修正系数偏小,数值模拟体型系数与规范的比值最大值是 2.89。

(4)海拔较低的迎风面和背风面山脚风速低,适宜建筑选址,如两交叉轴线的东、西两侧地势平缓区域。鼓浪屿“燕尾山—笔架山—鸡母山—英雄山”和“浪洞山—鸡母山—龙头山—升旗山”两山顶轴线是重要线性防风区域,其中的龙头山、鸡母山和笔架山山顶区为高风速频发且极值负压产生的区域,是加强建筑检修与维护、提高防风性能的重点,不宜作为建设选址。

参考文献 (References)

- [1] 王唯山. 鼓浪屿历史风貌建筑保护规划[J]. 城市规划, 2002, (7): 54 - 58. [WANG Weishan. The preservation planning for the historical buildings in Gulangyu Island, Xiamen[J]. City Planning Review, 2002, (7): 54 - 58]
- [2] 楼文娟, 吴登国, 刘萌萌, 等. 山地风场特性及其对输电线路风偏响应的影响[J]. 土木工程学报, 2018, 51(10): 46 - 55, 77. [LOU Wenjuan, WU Dengguo, LIU Mengmeng, et al. Properties of mountainous terrain wind field and their influence on wind-induced swing of transmission lines[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(10): 46 - 55, 77]
- [3] 胡伟成, 杨庆山, 张建. 多国规范山地风速地形修正系数对比研究[J]. 工程力学, 2018, 35(10): 203 - 211. [HU Weicheng, YANG Qingshan, ZHANG Jian. Comparative study on wind

- topography factor of hilly terrain by different codes and standards [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(10): 203 - 211]
- [4] 李正良, 徐姝亚, 肖正直, 等. 山地风速地形修正系数沿山坡的详细插值分布[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 23 - 31. [LI Zhengliang, XU Shuya, XIAO Zhengzhi, et al. Detailed interpolation distribution of hilly wind topographic factor along hillside[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(3): 23 - 31]
- [5] ABDI D S, BITSUAMLAK G T. Wind flow simulations on idealized and real complex terrain using various turbulence models [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 75(9): 30 - 41.
- [6] BLOCKEN B, HOUT AVD, DEKKER J, et al. CFD simulation of wind flow over natural complex terrain: Case study with validation by field measurements for Ria de Ferrol, Galicia, Spain [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 147(12): 43 - 57.
- [7] MUGHAL M O, LYNCH M, YU F, et al. Forecasting and verification of winds in an East African complex terrain using coupled mesoscale - And micro-scale models [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 176(5): 13 - 20.
- [8] LIU Zhenqing, ISHIHARA T, HE Xuhui, et al. LES study on the turbulent flow fields over complex terrain covered by vegetation canopy [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 155(8): 60 - 73.
- [9] 楼文娟, 梁洪超, 李正良, 等. 典型山地地形竖向风速分布特征 [J]. 空气动力学学报, 2018, 36(5): 791 - 797. [LOU Wenjuan, LIANG Hongchao, LI Zhenghao, et al. Vertical wind velocity distribution in typical hilly terrain [J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2018, 36(5): 791 - 797]
- [10] 孙毅, 李正良, 黄汉杰, 等. 山地风场中圆形截面超高层建筑风荷载谱 [J]. 重庆大学学报, 2011, 34(8): 24 - 30. [SUN Yi, LI Zhengliang, HUANG Hanjie, et al. Analysis of wind load spectrum of super tall buildings with round section in hilly terrain wind field [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(8): 24 - 30]
- [11] 孙毅, 李正良, 黄汉杰, 等. 山地风场平均及脉动风速特性试验研究 [J]. 空气动力学学报, 2011, 29(5): 593 - 599. [SUN Yi, LI Zhengliang, HUANG Hanjie, et al. Experimental research on mean and fluctuating wind velocity in hilly terrain wind field [J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2011, 29(5): 593 - 599]
- [12] 李正良, 魏奇科, 孙毅. 复杂山地风场幅值特性试验研究 [J]. 工程力学, 2012, 29(3): 184 - 191, 198. [LI Zhengliang, WEI Qike, SUN Yi. Experimental research on amplitude characteristics of complex hilly terrain wind field [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3): 184 - 191, 198]
- [13] 李正良, 魏奇科, 黄汉杰, 等. 山地超高层建筑风致响应研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 43 - 48. [LI Zhengliang, WEI Qike, HUANG Hanjie, et al. Wind-induced response of super tall buildings in hilly terrain [J]. Journal of Vibration and Shock,

- 2011, **30**(5):43–48]
- [14] 唐昂. 基于实际峡谷地形的近地风场特性研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2015:23–38. [TANG Ang. Study on characteristics of wind field in ground layer on actual canyon terrain [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2015: 23–38]
- [15] 汪汛, 周岱, 李煜, 等. 重檐歇山顶中国古建筑风压与风场数值模拟分析[J]. 上海交通大学学报, 2017, **51**(11):1287–1296. [WANG Xun, ZHOU Dai, LI Yu, et al. Numerical simulation on wind pressure and wind field of Chinese ancient buildings with multiple-eave and double-pith roof[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, **51**(11):1287–1296]
- [16] 潘安平. 沿海农村台风灾害区“避难所”优化布局理论与实践研究——以浙江为例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 167. [PAN Anping. Study on the theory and practice of optimization of shelters' layout in rural coastal typhoon-disaster-affected area—a case study of Zhejiang province [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010:167]
- [17] MOHAMED F Y, MESHARI A, MOHAMED A K. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations on the effect of rough surface on atmosphere turbulence flow above hilly terrain shapes [J]. Environmental Forensics, 2014, **15**(2):159–174.
- [18] 任兰红. 福建沿海部分历史文化街区缓减台风灾害措施研究[D]. 天津: 天津大学, 2018: 129. [REN Lanhong. Study of windproof tactic on partial coastal historical and cultural district in Fujian[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018:129]
- [19] 楼文娟, 刘萌萌, 李正昊, 等. 峡谷地形平均风速特性与加速效应[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, **43**(7):8–15. [LOU Wenjuan, LIU Mengmeng, LI Zhenghao, et al. Research on mean wind speed characteristics and speed-up effect in canyon terrain[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, **43**(7):8–15]
- [20] 丁鑫. 山地地形下低矮坡屋面风荷载数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014:73–74. [DING Xin. Numerical simulation of wind loads on the roof of low-rise gable-roofed buildings in hilly terrain[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014:73–74]
- [21] 雷鹰, 李涛, 张建国, 等. 厦门地区台风风场特性的数值模拟[J]. 工程力学, 2014, **31**(1):122–128. [LEI Ying, LI Tao, ZHANG Jianguo, et al. Numerical simulation of the characteristics of typhoon wind-field in Xiamen region [J]. Engineering Mechanics, 2014, **31**(1):122–128]
- [22] 沈国辉, 姚旦, 楼文娟, 等. 单山和双山风场特征的CFD数值模拟[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, **43**(1):37–44. [SHEN Guohui, YAO Dan, LOU Wenjuan, et al. Investigation of the wind field characteristics on isolate hill and two adjacent hills using CFD numerical simulation[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, **43**(1):37–44]

Wind Load of Kulangsu Historical and Cultural District Effected by Hilly Terrain

REN Lanhong¹, ZENG Jian^{1*}, ZENG Suiping^{2,3}

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Architecture, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

3. School of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The wind loads on the districts in mountainous environment are obviously different from those on flat land. The historical and cultural district in Kulangsu is located in typhoon-prone area, so it is very necessary for the scientific protection of historical buildings to carry out the research on the wind load effect in mountainous environment. Taking the historical and cultural district in Kulangsu as the research object, this paper used ANSYS Fluent to numerically analyze the influence of mountain topography on wind field and wind load shape coefficient of Kulangsu, and put forward some suggestions on the windproof protection and site selection of the existing buildings in this area. The results showed that: (1) The high wind speed, extreme speed-up ratio, extreme negative wind pressure and extreme wind load shape coefficient of Kulangsu were concentratedly distributed in mountain tops of the two cross-intersecting axes. The two axes were the core linear windproof areas, and the tops of Longtuo Mountain, Jimu Mountain and Bijia Mountain were the windproof focus. (2) The maximum speed-up ratio is near

the ground at the top of Longtou Mountain, which generated extreme wind load shape coefficient correspondingly. (3) The cross-wind speed-up ratios of the two axes were larger than that of the along-wind direction. The speed-up effect on the mountain top was larger than that on the cross-wind plane of the gorge which was larger than that at the bottom of the gorge. (4) The wind load shape coefficient obtained by numerical simulation at the mountain top was not much different from the value in the Load Code for the Design of Building Structure, and the modified coefficient at the gorge obtained from the Load Code for the Design of Building Structure was smaller than the numerical simulation value. (5) The wind speed was low in windward side and mountain foot at the leeward side with low elevation, which were appropriate for building site selection. Hilltops of Longtou Mountain, Jimu Mountain and Bijia Mountain were areas with frequently high wind speed and extreme negative wind pressure. Therefore, these areas were the focus of strengthening building maintenance and improvement of windproof performance, and should not be used as construction site selection.

Key words: Kulangsu historical and cultural district; hilly terrain; wind speed; wind pressure; wind load shape coefficient; CFD simulation of wind environment