

基于实际峡谷地形风场数值模拟的建筑微观选址

唐 昂^a, 傅 军^b, 施红辉^a, 董若凌^a

(浙江理工大学, a. 机械与自动控制学院; b. 建筑工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 利用高分辨率地形高程数据建立山区地形模型,运用计算流体力学(CFD)技术,对峡谷近地层风场进行数值模拟,评估该地貌下风场特性的分布规律,提出建筑微观选址建议。以45°方向为间隔对风场区域进行数值模拟,对比模拟结果发现:来流风向与峡谷夹角越小,峡谷内风速增强效果越明显;气流受到地形走势不同山体的遮挡效应干扰,流速出现不同程度加强;气流进入开阔地带后,风速降低,湍流强度变化趋向稳定。在风速较小、湍流变化稳定的地区可作为建筑微观选址的最佳区域。

关键词: 峡谷地形; 数值模拟; 风剖面; 湍流强度; 建筑选址

中图分类号: TU984.1

文献标志码: A

0 引 言

随着我国经济的快速发展,对沿海丘陵地区开发建设的需求日益迫切。这些区域地形地貌结构特殊,由于各种地形的阻碍干扰作用,近地层流动风场会出现气流上升、下沉和局地绕流等复杂多变的运动形式,在季风、台风、副热带高压等天气系统的影响下,更易发生因较强风荷载对建筑物结构产生功能损坏的情况。因此在整个山地城市规划设计过程中,建筑场地的预选址工作起着重要的作用。

对山地地形的风场研究,Griffiths等^[1]利用CFD技术模拟不同坡度山形下过山气流的湍流情况,得到了风场变化的一般规律。李正良等^[2]拟合分析了针对不同地貌特征下山地风加速效应的修正算法。但这些研究并未针对实际峡谷地形的变化来考虑建筑选址,对实际工程应用的指导意义有限。

本文以奉化市裘村镇黄贤村山体地形为研究对象,获取复杂地形条件下高分辨率的地形表面数据,采用CFD数值模拟方法^[3],对整个峡谷地形的风场

特性进行数值计算,研究峡谷内风剖面 and 湍流强度的分布规律,对山地建筑的选址工作提供建议。

1 高精度地形模型数字化

美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合绘制的SRTM(shuttle radar topography mission)数据库覆盖了地球陆地表面80%以上的地形数据,对复杂山体丘陵等地形具有较高精度的雷达影像数据。为快速建立大范围地形的计算模型,在该数据库中下载宁波市沿海山区的数字地形高程数据,生成tif格式的文件^[4]。将高程数据与当地已知区域的海拔高度和经纬度进行对比验证,以保证地形数据的正确性。将地形文件导入地图绘制软件Global Mapper中,利用空间产品制作功能对地形表面进行离散化处理,生成分辨率为5m的等高线图,如图1所示。在三维建模软件Rhinoceros中进行数据的转换和处理,导出具有光滑曲面的三维实体模型,该模型文件可在ICEM软件中进行网格划分,如图2所示。为方便描述不同山体模型之间的相互作用,将四个独立山体依次命名为1、2、3、4号

收稿日期: 2014-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178432);住房和城乡建设部科技项目(2013-k6-13);国家级大学生创新创业训练计划项目(201410338013)

作者简介: 唐 昂(1990-),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事流体数值模拟方面的研究。

通信作者: 傅 军, E-mail: fujun@zstu.edu.cn

山体,并对峡谷地形的典型区域进行编号,分别为A、B、C、D、E,如图2所示。

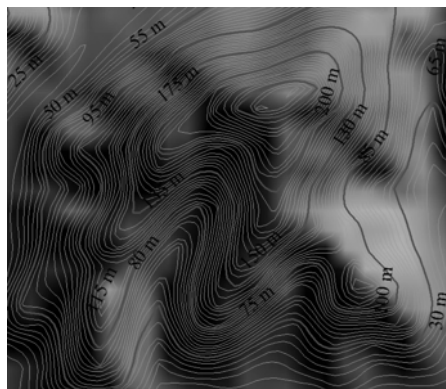


图1 黄贤村局部山体的等高线(放大图)

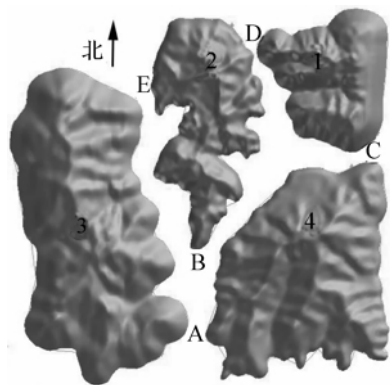


图2 黄贤村山体的三维实体曲面

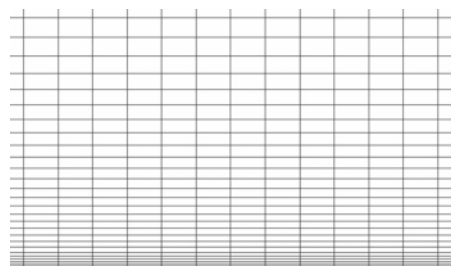
2 几何模型

整个裘村镇山体模型的核心地区长(x 方向)4 081 m,宽(y 方向)4 263 m,高(z 方向)320 m。为使大气运动得到充分发展,需要设置合适尺度的计算区域,使流域阻塞率小于3%,避免因计算域过小造成的局部压缩效应和尾部回流效应。为满足该要求,将计算区域设定为16 km \times 36 km \times 1.3 km,其中模型距离上游入口2倍山体长度,距离下游出口6倍山体长度,此时阻塞率为1.9%,满足计算要求。

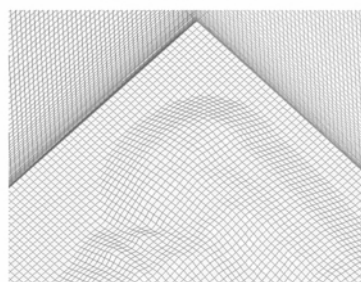
2.1 网格划分

由于气流在靠近地面位置变化剧烈,为保证计算精度,将计算区域分为内区和外区,采用质量较高、均匀性较好、计算收敛迅速的六面体结构化网格。首先划分地面网格,在靠近山体的核心区对网格进行加密,最小网格尺度为20 m;沿顺流和横风方向利用网格节点控制功能实现网格由密到疏的过渡,增长因子设定为1.15;在垂直高度方向,沿地面地区设定边界层,第一层网格高度按照非平衡壁面

函数要求设定,增长因子设定为1.07,最大网格尺寸为30 m。网格总数量约为850万,计算区域网格如图3所示。



(a) 地面边界层网格



(b) 核心区网格

图3 核心山体处的局部网格

2.2 计算工况和观测点设置

为全面反映不同方向来流风的影响,本次数值模拟在0 \sim 360 $^{\circ}$ 风向范围内由南向北(定义为0 $^{\circ}$ 风向角)开始、按逆时针方向每隔45 $^{\circ}$ 设置一个风偏角工况,总共进行了8个不同风偏角工况的数值模拟。根据当地气象局的统计资料,该地区受季风气候影响,常年主导风向为NNW和SSW(即西北偏北方向和西南偏南方向)。这两个风向分别和180 $^{\circ}$ 及325 $^{\circ}$ 风向角吻合较好,在数值计算过程中可重点考虑这两个风向角下峡谷地形风场的分布特性。在峡谷内按照地形走势选取50个点,记作点1,点2, \dots ,点50,对每个观测点沿高度方向每隔5 m选取一个计算点,一共选取50个计算点。观测点设置如图4所示。

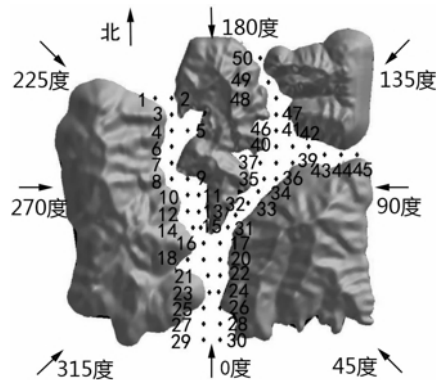


图4 来流风向和观测点的设置

3 求解方法

3.1 湍流模型选取

设置计算流域内为三维定常不可压缩流动,整个过程可用流体力学基本方程组描述。Fluent 14.0 基于雷诺平均(RANS)思想的湍流模型有3种:标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG 模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型。相比其他两种模型,Realizable $k-\epsilon$ 模型改变了湍流涡黏系数计算式中系数的取值方法,采用与应变率相关的非常数值,在模拟流动分离和复杂二次流时具有更高的精确度,能够更好地模拟山体表面平均风速和湍流强度的变化过程^[5]。具体方程如下:

$$\frac{\partial(\rho \bar{\mu}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{\mu}_i \mu_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\eta \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i' u_j' \right), i=1,2,3 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right] + G_\kappa + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_\kappa \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v\epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (3)$$

式中: ρ 为介质密度; μ_i, μ_j 为速度矢量; x_i, x_j 为位置矢量; κ 为湍流动能; ϵ 为湍流流耗散率; μ 为分子黏度; μ_t 为湍流黏性系数; G_κ 为平均速度梯度引起的湍动能产生项; G_b 为浮力影响引起的湍动能产生项; Y_M 为可压缩湍流脉动对总耗散率的影响; S_ϵ 为源项; $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$; $\eta = S \frac{\kappa}{\epsilon}$; $S = \sqrt{2} S_{ij}$; S_{ij} 为应变变化率张量; $\sigma_\kappa, \sigma_\epsilon, C_1, C_2, C_{1\epsilon}$ 为经验常数。

3.2 边界条件

本文假设空气运动是 3D 的不可压缩稳定流,不考虑热对流的影响,所有湍流都是因为机械作用产生的。

根据当地气象部门的监测数据,标准参考高度 z_0 为 10 m 处的平均风速为 12.83 m/s。根据我国《建筑结构荷载规范》^[6],该地区地表类别符合 B 类地形,地面粗糙度系数 α 取值 0.16,大气边界层厚度取值为 350 m。流场入口边界为速度入口边界条件(velocity-inlet),采用指数律风速剖面:

$$v(z) = 12.83 \times \left(\frac{z}{z_0} \right)^{0.16} \quad (4)$$

入口处的湍流强度 I ,湍流动能 k ,湍流积分尺度 L_u 和湍流耗散率 ϵ 分别表示如下:

$$I = \begin{cases} 0.23, & z < 5 \\ 0.1 \left(\frac{z}{350} \right)^{-0.21}, & z \geq 5 \end{cases} \quad (5)$$

$$k = \frac{3}{2} [\nu(z) I]^2 \quad (6)$$

$$L_u = \begin{cases} 100, & z \leq 30 \text{ m} \\ 100 \left(\frac{z}{30} \right)^{0.5}, & z > 30 \text{ m} \end{cases} \quad (7)$$

$$\epsilon = (0.09 \frac{3}{4} k^{\frac{3}{2}}) / L_u \quad (8)$$

以上各式通过自编 UDF 程序实现在 Fluent 中的接入。

出口边界设置为压力出口。山体壁面采用非平衡性壁面函数,并设置物理粗糙高度^[7]。流体域顶面和侧面采用对称边界条件。

流动对流项离散格式均采用二阶迎风格式,采用 SIMPLEC 算法处理压力与速度耦合。当所有变量的迭代无量纲残差降低至 10^{-5} 以下且达到稳定时,认为计算收敛。

4 模拟结果分析

4.1 主流风场确定

在不同风向下,将海拔高度相同的计算点的速度均值近似作为该风向下山地风场的平均风速。比较不同来流风向下的风速变化情况,确定经过山体干扰后的主流风场的方向。图 5 为不同来流方向下观测点的平均风速剖面图。

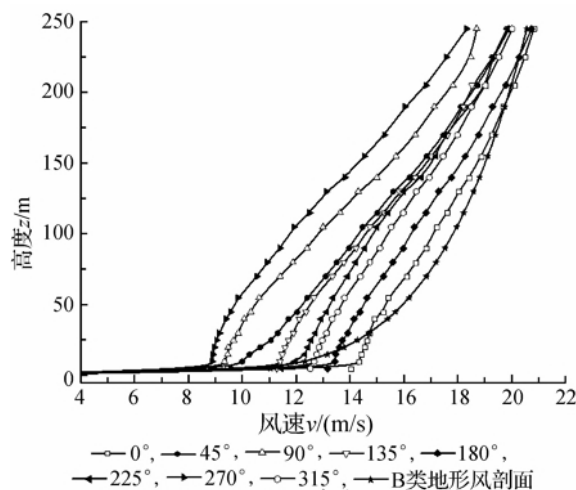


图5 不同风向下峡谷地形的平均风剖面

由图 5 可见,当来流风向垂直于 3 号和 4 号山体时,由于受到山体的直接遮挡,峡谷场地内风速度明显减弱(90°风向和 270°风向)。当来流风向与建筑场地的地形走势基本一样或者呈现较小夹角时,建筑场地内的风速剖面呈现不同程度的加强效应。

由于建筑选址要避免风能密度、湍流强度等较大的地区,因此选用 0° 和 180° 风向作为该风场下的最不利工况进行分析。

4.2 主风向下的流场分析

对主流风向下山体近地层($z=10$ m)的平均速度分布进行分析,得到气流在整个峡谷地形内的发展过程和最终状态。

从图6、图7比较可以看出,当气流由 0° 方向从开阔地带进入山区峡谷时,由于“狭管效应”的影响,空气流速增大,当流经到B区域时,受到2号山体的阻挡作用,山体正面的一部分气流继续上升绕过

山体前进,而其他气流则分为两部分从山体两侧分别绕流到左右两侧流道中。峡谷两侧山体地形走势不同,对峡谷内风场的阻挡和干扰程度也不同。右侧4号山体使谷口宽大逐步增大,在垂直高度上坡角变化缓慢,山体边界层厚度较小,沿A-B-D方向前进的气流始终保持在较低风速范围,随着下游区的进一步发展,速度逐步变小。左侧峡谷中2号山体的局部凸出地形与来流方向呈现较大夹角,在爬坡效应的影响下,风速呈现一定程度的增强。由于出口处峡谷宽度急剧缩小,两侧气流均出现加速效应。

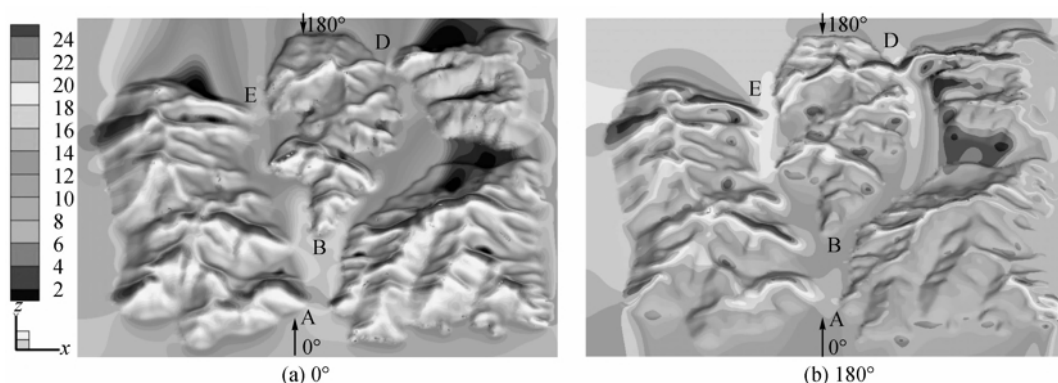


图6 0° 和 180° 风向下山地近地层平均风速分布

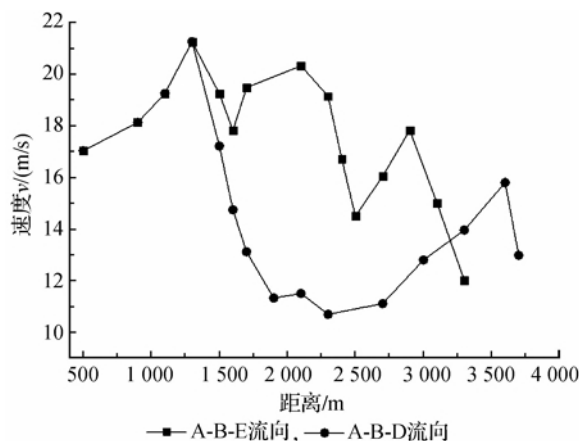


图7 0° 风向下10 m高度处不同流向方向上部分测点的瞬时速度

4.3 特殊区域风场特性分析

在最不利风向下,选取平均速度较低,湍流脉动变化稳定区域的观测点,分析该位置下的空气流动情况。图8为部分观测点在最不利风向下风速剖面图。

由图8看出,各个观测点位置的平均风速受峡谷地形走势影响较大,阻碍山体的地形越陡峭,与来流风的偏角越大,测点平均风速就越大。

180° 风向下,空气沿E-B-A流向前进时,在测

点10、11位置处由狭窄地带进入开阔地带,2号山体山坡起伏不明显,海拔高度相对3号山体西侧区域较低,使气流有一个明显的减弱效应。10号测点更加靠近西侧陡峭山体,由于山体边界层的干扰作用,平均风速会略高于11号测点。气流经过14号测点位置时,谷口宽度减小,与沿D-B-A流向运动的气流汇集,并受3号局部突出山体的阻挡,在较小范围内生成不断叠加的旋涡型流场,气流呈现风速加强效应。右侧D-B流道两侧山体海拔高度较低,地表起伏相对平缓,整个地区平均风速变化程度较小。

从距离谷底10 m高度处开始,右侧峡谷测量点附近风速普遍低于左侧测量点附近风速。

湍流强度是表示瞬时风速偏离平均风速的程度,是评价结构脉动风荷载的指标,定义为脉动风速均方根与水平平均风速的比值。部分观测点湍流强度沿高度方向的变化如图9所示。

由图9可知,在 180° 风向下,在海拔高度低于100 m的近地风场,10—14测点区域相比36—38测点区域受局部山体特征的影响较大,湍流强度变化剧烈,流场复杂多变,不适宜在此地进行建筑物的规划设计。

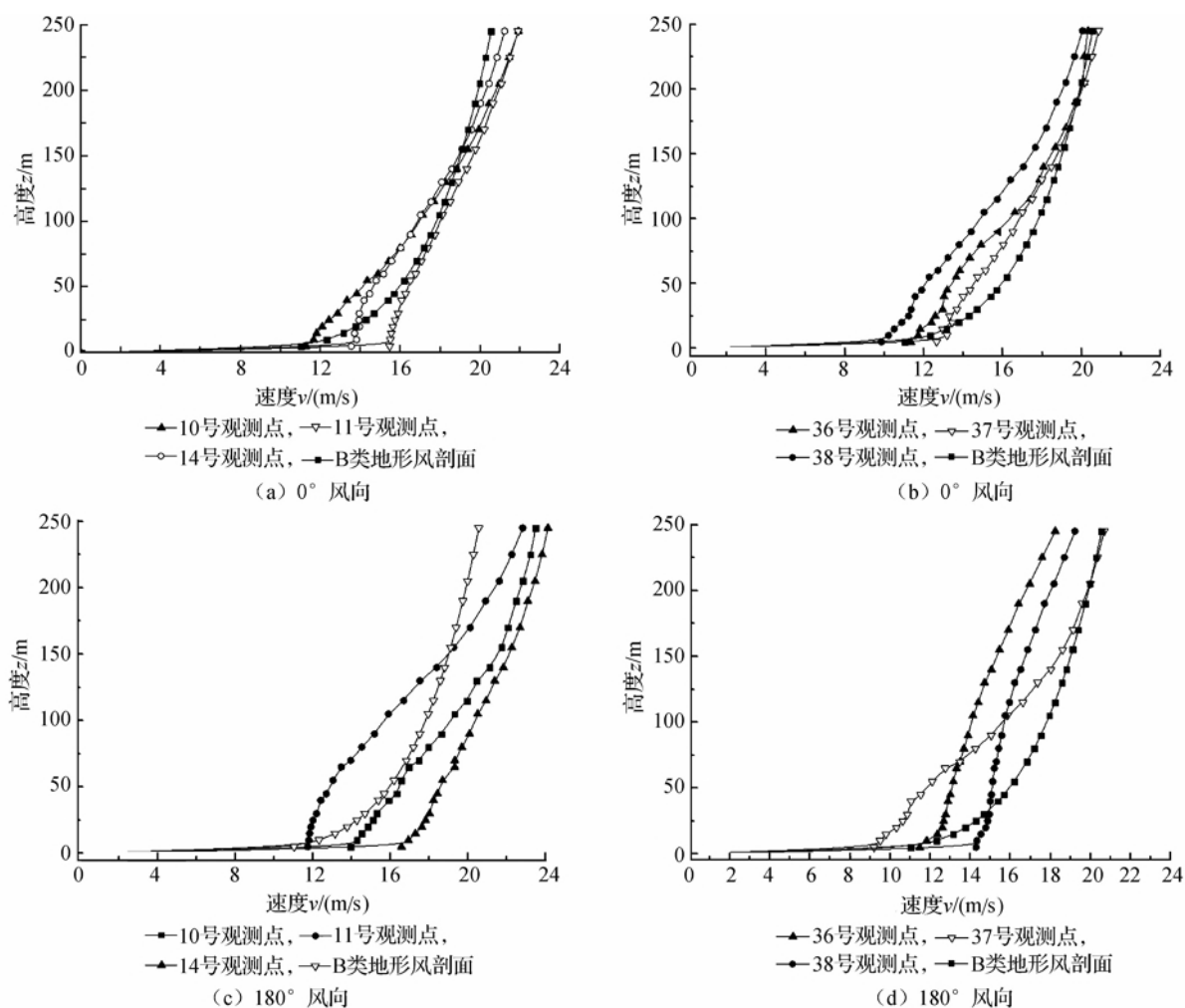


图8 0°和180°风向下特殊观测点的垂直风剖面对比

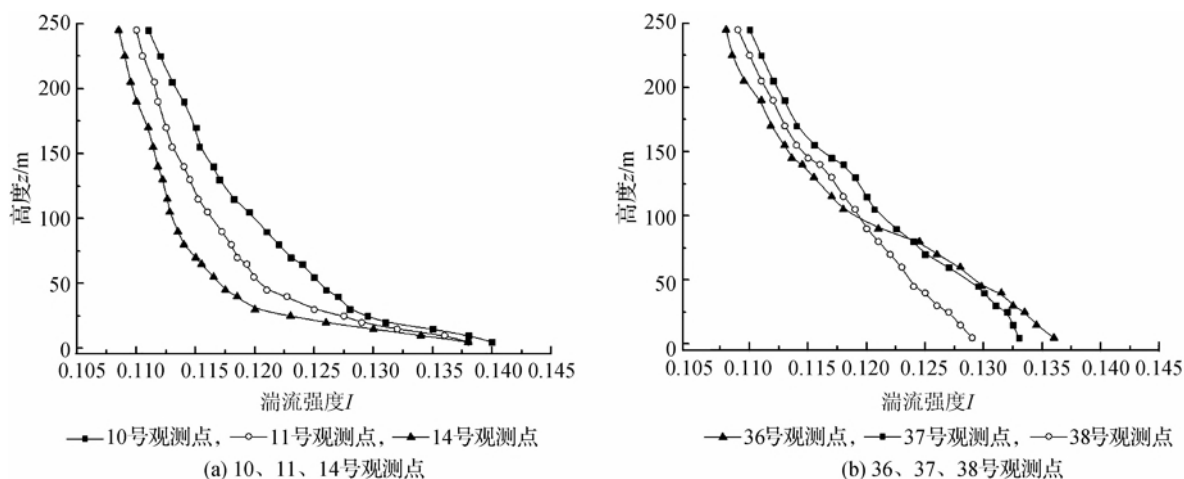


图9 180°风向下部分观测点的湍流强度变化

5 建筑选址

在进行基础建筑设施规划设计前,需要对整个地区的地质特征、气象灾害、交通运输等条件进行综合分析。靠近山体的区域因地质类型脆弱易出现山

体滑坡、塌方等灾害情况;山谷入口和狭窄地带由于风力汇聚造成的加速效应,会对建筑物造成较强的功能损坏作用;山体背风坡地区会产生流动分离现象,湍流强度变化紊乱,压力梯度变化较大,流动极不稳定,不利于布置对风荷载敏感的建筑。综合考

虑上述情况,36—38 观测点及其周围区域由于面积较大,地形平坦开阔,在最不利工况下平均风速相比其他各处较小,湍流强度变化平稳,适宜作为建筑选址区域。

6 结 论

以宁波市裘村镇山区地形为研究对象,通过数值模拟获得峡谷内近地层风场特性参数,通过对特殊观测点附近区域平均风剖面 and 湍流强度的分析比较,选取适宜的位置作为建筑场地,主要结论如下:

a) 当来流风向和峡谷地形走势一致或者夹角较小时,受到“狭管效应”的影响,峡谷内风速出现明显的加速效应;

b) 在最不利风向工况下,峡谷内风场速度受两侧山体地形走势影响较大。当山体海拔高度较低,坡度变化平缓时,产生的山体边界层对峡谷内风速影响较小,在山脚局部地区会出现风速较弱现象;

c) 观测点 36—38 附近区域地形平坦开阔,通

往峡谷外地区的出口较多,交通便利,平均风剖面相比其他位置较低,湍流强度变化稳定,有利用建筑场的抗风设计工作,适宜作为建筑选址的区域。

参考文献:

- [1] Griffiths A, Middleton J. Simulations of separated flow over two-dimensional hills[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(3): 55-60.
- [2] 李正良, 孙 毅, 魏奇科, 等. 山地平均风加速效应数值模拟[J]. *工程力学*, 2010, 27(7): 32-37.
- [3] 王福军. 计算流体力学分析:CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 120-131.
- [4] 陈士凌. 适于山地城市规划的近地层风环境研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [5] 周志勇, 肖 亮, 丁泉顺, 等. 大范围区域复杂地形风场数值模拟研究[J]. *力学季刊*, 2010, 31(1): 101-107.
- [6] GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S].
- [7] 邓院昌, 刘 沙, 余 志, 等. 实际地形风场 CFD 模拟中粗糙度的影响分析[J]. *太阳能学报*, 2010, 12(31): 1644-1647.

Micro Building Site Selection Based on Numerical Simulation of Wind Field on Actual Canyon Terrain

TANG Ang^a, FU Jun^b, SHI Hong-hui^a, DONG Ruo-ling^a

(a. School of Mechanical Engineering & Automation; b. School of Civil Engineering and Architectural, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Terrain model on mountainous area is set up by use of high-resolution terrain elevation data. Computational fluid dynamics (CFD) technology is used for numerical simulation of wind field at surface layer in the canyon to evaluate distribution law of wind field under the landform. Besides, micro site selection suggestion is proposed. Numerical simulation is carried out for the wild field area at the interval of 45°. It is found through comparing simulation results that included angle of the inlet wind and the canyon is smaller, and the velocity in the canyon enhances more obviously; under the shielding effect of the different terrain hills, flow velocity enhances to different degrees; after airflow enters an open area, the wind speed reduces and changes in intensity of turbulence tend to be stable; the area wit small wind speed and stable changes in intensity of turbulence can serve as the optimal area of micro building site selection.

Key words: canyon terrain; numerical simulation; wind profile; intensity of turbulence; building site selection

(责任编辑: 张祖尧)