

山体地形中粗糙度对风速的影响研究

冯 林¹, 傅 军², 施红辉¹, 董若凌¹, 章利特¹

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 采用CFD方法对影响情况进行研究,首先利用三维软件生成某实际案例复杂地形的模型,进行不同湍流模型在西南风下各测点位置模拟速度与实际风速的比较,表明 Realizable $k-\epsilon$ 模型误差较小;再模拟不同粗糙度、坡度及地貌类型对简单二维、三维地形、实际案例复杂地形的风速影响。结果表明:在简单二维和三维中,在相同坡度下,A、B类地貌中迎风面和背风面上的风速随粗糙度的增大而变小;而在C、D类地貌却变大;顶点在4类地貌中的风速随粗糙度的增大而变小。复杂地形在B类地貌中的风速随粗糙度的增大而变小,但变化幅度不是很大。

关键词: CFD; 湍流模型; 粗糙度; 山体地形; 风速

中图分类号: P425.3

文献标识码: A

0 引 言

复杂山体地形风速的数值模拟研究一直是人们关注的热点。Jackson 等^[1]通过风洞实验研究山坡坡度小于 0.125 的风速和剪切应力与山体尺寸、形状以及表面粗糙度程度变化的关系。Farell^[2]通过风洞实验研究粗糙元对风剖面、湍流范围和湍流强度的影响。Ross 等^[3]研究地面粗糙度较大时的湍流特征。谢 东^[4]对复杂地形研究得出粗糙度小的地形气流输运能力大于粗糙度大的地形。邵文波^[5]研究对 Askervein 山在 B 类地貌中的风速随着粗糙度的增大而减小,但变化幅度不大。赵永锋等^[6]研究以简单二维地形模型分析模拟边界条件对模拟的影响,并进一步讨论了三维地形模型的研究。郭文星^[7]在风洞实验中测量了山坡、山脊和孤立山丘 3 种典型山体的风场,并与模拟结合得出了与实验最接近的湍流模型和壁面函数。唐 昂^[8]分析来流风速、来流风向角、地形走势、山体坡度、山间距离、谷口尺度等因素对峡谷风平均风剖面和湍流结构的影响。

已有研究结果表明粗糙度对地形有影响,但尚未详细研究不同山体地形中不同地貌粗糙度对风

速的影响。本文采用 CFD 方法,分析研究简单二维、三维山体和实际案例复杂地形的粗糙度对风速的影响影响。案例地形选取奉化市裘村镇黄贤村山体。

1 湍流模型确定

1.1 计算模型

从美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合发布的 SRTM (shuttle radar topography mission) 数据库中下载浙江省奉化市黄贤村附近沿海山区地形的高程数据,生成*.tif 格式的文件^[9]并导入 GlobalMapper 软件中生成分辨率 5 M(5 megapixels)的等高线,导入三维软件中对等高线进行转化与处理,生成光滑曲面的三维地形模型,附近主要有 5 座山,分别为 A1、B1、C1、D1、E1,其中黄贤村主要位于 F1 位置,如图 1 所示。因山地的最高海拔为 275 m,由文献[6]可知,计算域高度和前后延伸长度大都为 8 倍的山高以上,对山地流场的影响可忽略不计,而最高山体的高度为 245 m,所以设计流场计算区域的高度为 2 km,与山体的四周边界延伸大致为 2 km。将三维模型导入 ICEM 中生成网格。

收稿日期: 2016-08-22

基金项目: 住建部科技项目(2014-K4-010); 浙江省基础公益研究计划(LGF18E080016)

通信作者: 傅 军(1970—), 男, 博士、副教授, 主要从事土木工程方面的研究。fujun@zstu.edu.cn

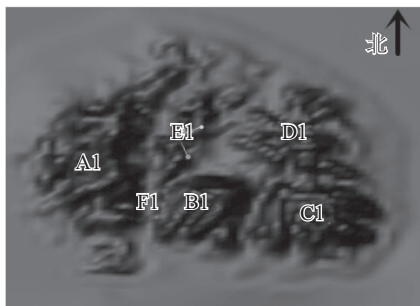


图1 复杂地形模型

Fig. 1 Complex terrain model

1.2 求解参数

因为模型建立时已考虑风向,所以风向沿垂直入口面方向进入流场。根据我国建筑结构荷载规范^[10],风速入口的剖面变化公式^[8]为:

$$v(z)/v_0 = (z/z_0)^\alpha \quad (1)$$

式中, v_0 ——附近气象观测站在高度 z_0 测得的风速; z ——任意高度; $v(z)$ —— z 高度的平均速度; α ——地面粗糙度系数。

流场入口为速度入口,流场出口条件为压力出口。地面采用无滑移边界条件,并引入非平衡壁面函数解决近地面相对复杂的湍流运动形式。流体域顶面和侧面采用对称边界条件。

对计算的模型求解器选用不可压缩及低速流动流体的全隐式的分离式求解器,速度与压力的耦合采用 SIMPLE 算法,对流项的离散使用二阶迎风标准格式,计算收敛的标准为流场中所有的物理量残差为 10^{-5} 。

1.3 湍流模型比较

在 CFD 计算中基于 RANS 湍流方程公式运用最为广泛,因此选用 Fluent 中湍流模型的标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型与现场实测数据对比,选择误差较小的模型。本文选择的实测地形为黄贤村山体,选取当天风向大概为西南风(约 225° ,本文中记正北方向为 0° 风向)所测得的数据取平均值^[8]。根据当地地形的情况,地面粗糙度系数为 0.16。模拟以当天平均风速 1.2 m/s 作为入口风速,在三维模型中选取测试的 6 个位置点(图 2),计算取得 6 个点的速度,与现场测试的结果对比如图 3 所示。

从图 3 可得: RNG $k-\varepsilon$ 模型模拟的结果误差最大,其中 B2、D2 的误差稍小,约为 4.5%;其次为标

准 $k-\varepsilon$ 模型,在 E2、F2 中误差较小,其他点的误差平均为 4%; Realizable $k-\varepsilon$ 模型模拟与现场实测的结果误差最小,在 B2、E2、F2 中误差最小,平均误差约为 3%。存在的误差原因为: 1) 地面粗糙度的影响; 2) 人工测量风速过程的误差; 3) 测试与模拟选取的点位置可能存在误差。

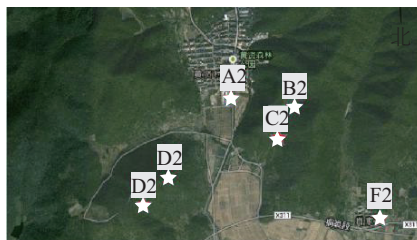


图2 风速测点位置

Fig. 2 Wind speed measuring point position

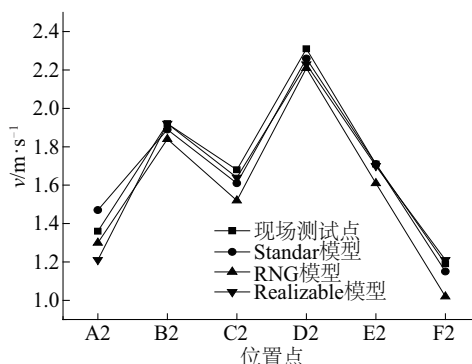


图3 湍流模型与现场测试风速对比

Fig. 3 Compared turbulent model and test date

2 粗糙度取值

因地表起伏不平或地物本身几何形状的影响,风速为零的位置并不在地表,而是在离地表一定高度处,这一高度被定义为地表粗糙度 r_h , 单位为 m。

我国荷载规范将地貌分成 A、B、C、D 这 4 类,其中 B 类为标准地貌。4 类地貌的区分如表 1 所示。

表1 我国规范4类地貌

Table 1 Standard four types of landforms in China

类别	下垫面性质	α	Z_g/m
A	近海海面、海岛、海岸及沙漠地区	0.12	300
B	田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋较稀疏的乡镇和城市郊区	0.16	350
C	有密集建筑群的城市市区	0.22	400
D	有密集建筑群且房屋较高的城市市区	0.30	450

注: α ——地面粗糙度系数; Z_g ——梯度风高度。

基于不同粗糙度影响下的风剖面及有关资料,依据国内外规范所选的数值,相当于我国规范 4 个地貌类别的范围,如表 2 所示。

表 2 不同地貌对应的粗糙度和梯度风高度值

Table 2 Different landforms correspond roughness and gradient wind high value

地貌	海面	空旷平坦地面	城市	大城市中心
α	0.10~0.13	0.13~0.18	0.18~0.28	0.28~0.44
r_h/m	0.001~0.010	0.01~0.10	0.10~0.50	0.50~2.00
Z_g/m	200~325	250~375	300~425	350~500

注: r_h —地面粗糙度; Z_g —梯度风高度。

为研究不同地貌的不同粗糙度对地形的影响,综合表 1 和表 2,在 A 类地貌中选取粗糙度值为 0.001、0.005、0.008 m; B 类中选取 0.01、0.03、0.05 m; C 类中选取 0.1、0.2、0.4 m; D 类中选取 0.5、0.8、1.0 m。

3 简单二维山体数值模拟研究

3.1 几何模型建立

山丘地形的理想轮廓线方程主要有:

1) 贝尔模型、高斯模型、余弦模型、正弦模型^[11],在本模拟中采用余弦模型:

$$H[1 + \cos(\pi r/2L_1)]/2 \begin{cases} r=x \text{ (二维)} \\ r=\sqrt{x^2+y^2} \text{ (三维)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, H ——山体的高度; r ——二维模型中为 x , 三维模型中为 $\sqrt{x^2+y^2}$; L_1 ——山体模型一半高度处对应的点与山顶点的水平距离; x 、 y ——山体某点的横、纵坐标。

2) 山丘坡度 R 的定义^[12]:

$$R=H/(2L_1) \quad (3)$$

本文研究的坡度 R 选取为 0.2、0.4、0.5、0.8、1.0, 山的高度统一为 200 m, 所以山的宽度分别为 2000、1000、800、500、400 m。图 4 中所示 D 是计算域高度, 坡度为 0.5, 单个山体的宽度 $L=4L_1=800$ m。为减小计算域对模拟的影响, 设置计算域山前段和后段的水平延伸为 2000 m, 计算域的高度为山高的 8 倍以上。将模型在 ICEM 中进行划分网格。

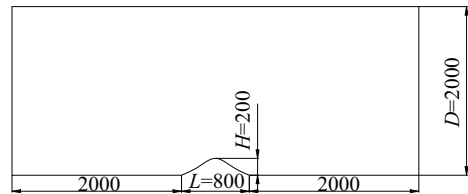


图 4 $R=0.5$ 的二维地形(m)

Fig. 4 Two-dimensional terrain when $R=0.5$ (m)

3.2 数值模拟结果分析

图 5 是不同坡度下风速入口为 12.32 m/s 时, 二维山体粗糙度影响山体的迎风面和背风面及山顶速度的变化图。图中横轴数字 1~5 分别代表山体的迎风面山脚、迎风面山腰、山顶、背风面山腰、背风面山脚。从图 5 得出, 在相同坡度下, B、C、D 类地貌的迎风面和背风面上风速变化幅度不是很大, 而在 A 类地貌中坡度为 0.2 时, 粗糙度为 0.001~0.005 m 时迎风面和背风面上的风速变化幅度较大; 在 A、B 类地貌的迎风面和背风面上风速随着粗糙度的增大而变小, C、D 类地貌的迎风面和背风面上的风速随粗糙度的增大而变大。顶点在 A、B、C、D 这 4 类中的风速随粗糙度的增大而变小, 且在 A 类地貌中粗糙度为 0.001 m 时风速最大, D 类中粗糙度为 1.0 m 时风速最小。在迎风面山脚中, 坡度为 0.2 和 0.4 时, 从 A 类到 D 类中, 风速是逐渐变小的; 坡度为 0.5、0.8、1.0 时, 风速从 A 类到 C 类是逐渐变小的, 在 D 类地貌中, 风速逐渐变大, 且在 A 类风速区间之间。在迎风面山腰中, 在相同坡度中的风速从 A 类到 D 类是逐渐变小的。在背风面中, 在相同坡度中的风速在 A 类到 B 类是变小的, 从 C 类地貌就开始变大, 且在 C 类地貌中背风面山脚的风速是最小的。在相同坡度中, 1 到 2 位置的风速变化幅度随粗糙度的增大基本保持不变; 2 到 3 位置的风速变化幅度随粗糙度的增大而变小; 3 到 4 位置的风速变化幅度随粗糙度的增大而变小; 4 到 5 位置的风速变化幅度基本一致。例如坡度为 0.5, 地貌为 A 类时, 1 到 2 位置的风速变化幅度为 72%; 2 到 3 位置的风速变化幅度为 100%, 地貌为 B 类时 2 到 3 位置为 95%, C 类时为 80%, D 类为 70%; 3 到 4 位置在 A、B 类地貌时降幅为 300%, C 类时为 200%, D 类为 100%; 4 到 5 位置的变化幅度为 30%。

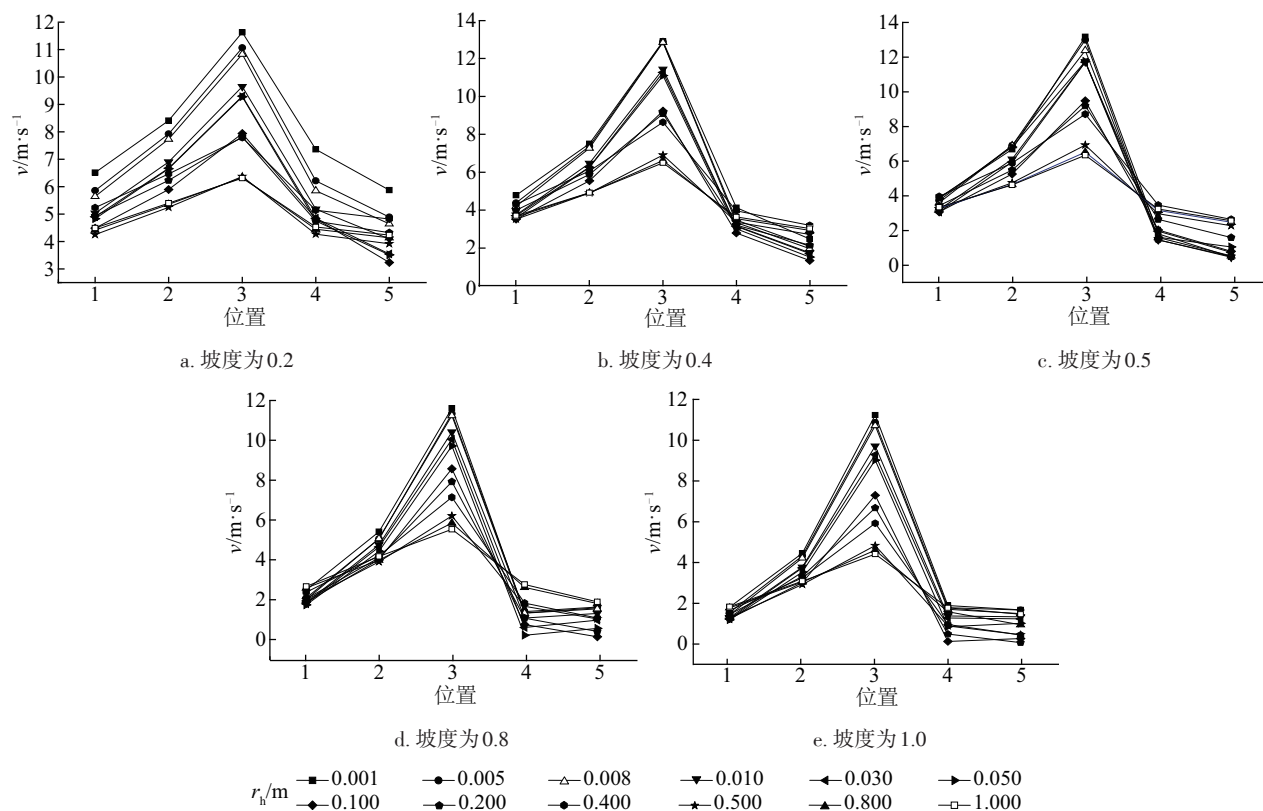


图5 二维山体不同坡度下不同粗糙度下的速度

Fig. 5 Speed of different roughness on different slope in two-dimensional terrain

4 简单三维模型模拟研究

为了能将计算结果与二维模拟结果联系作比较分析,采用余弦模型的简单孤立三维山丘轮廓模型进行同条件下的计算分析,计算域高度为 2000 m,前后水平延伸为 2000 m,如图 5 所示。研究坡度为 0.2、0.4、0.5、0.8、1.0 下 4 类地貌的粗糙度对三维山体的影响,高度统一为 200 m。在 ICEM 中对三维山体进行网格的划分,图 6 的坡度为 0.5。

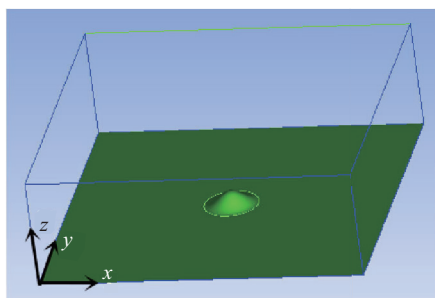
图6 $R=0.5$ 三维地形模型Fig. 6 Three-dimensional terrain when $R=0.5$

图 7 是不同坡度下风速为 12.32 m/s 风速入口,三维山体粗糙度影响山体的迎风面和背风面及山顶速度的变化图。图中横轴数字 1~5 分别代表山体 $y=0$ 剖面的迎风面山脚、迎风面山腰、山顶、背风面山腰、背风面山脚。从图 7 可得出,在相同坡度下,B、C、D 类地貌的迎风面和背风面上风速变化幅度不是很大,而在 A 类地貌中坡度为 0.2 时,粗糙度为 0.001~0.005 m 迎风面和背风面上的风速变化幅度较大;在 A、B 类地貌的迎风面和背风面上的风速随粗糙度的增大而变小,C、D 类地貌的迎风面和背风面上的风速随粗糙度的增大而变大。顶点 A、B、C、D 这 4 类中的风速随粗糙度的增大而变小,且在 A 类地貌中粗糙度为 0.001 m 时风速最大,D 类中粗糙度为 1.000 m 时风速最小;当坡度为 0.8 和 1.0 时,在 C 类地貌中顶点的风速降幅变大,约为 10%。在相同坡度中,1 到 2 位置的风速变化幅度随粗糙度的增大基本保持不变;2 到 3 位置的风速变化幅度随粗糙度的增大而变小;3 到 4 位置的风

速变化幅度随粗糙度的增大而变小;4到5位置的风速变化幅度基本一致。例如坡度为0.5,地貌为A类时,1到2位置的风速变化幅度为44%;2到3位置的风速变化幅度在A类地貌约为110%,在B类为100%,C类为60%,D类为50%;3到4位置的风

速变化幅度在A、B类为300%,C类为150%,D类为70%;4到5位置变化幅度为25%。结合二维模拟研究比较,表明在模拟二维和三维粗糙度研究中结果是相似一致的。

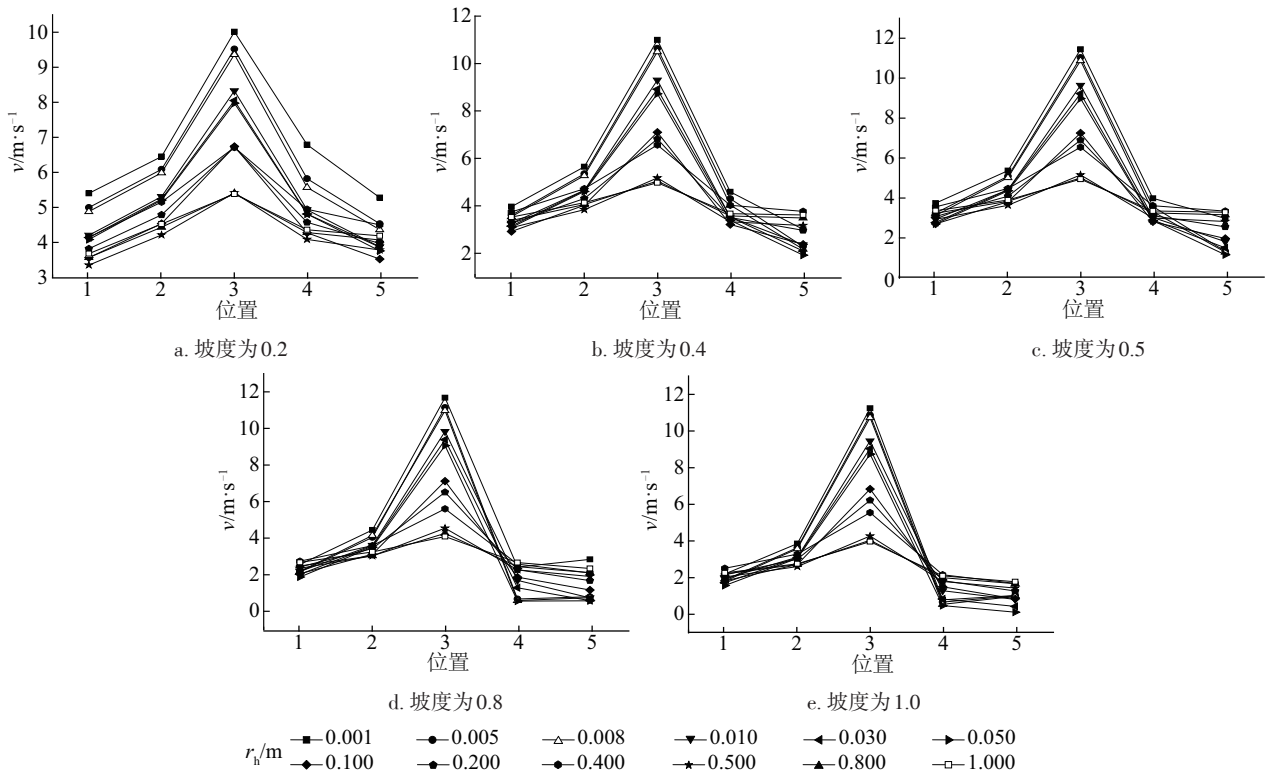


图7 三维山体不同坡度下不同粗糙度下的速度

Fig. 7 Speed of different roughness on different slope in three-dimensional terrain

5 复杂地形数值模拟研究

选取黄贤村附近 A1、B1 这 2 座山为研究对象,在迎风面、背风面上选取 17 位置点和现场测试点 5 个作为研究粗糙度的影响。风向为西南风且风速为 1.2 m/s 作为入口的边界条件,其中 1~3 为 A1 山迎风面上,4 为 A1 山的山顶,5、6 为 A1 山背风面上;7、8 和 12~14 为 B1 山迎风面上,9、15 为 B1 山山顶,10、11、16、17 为 B1 山背风面上,18~23 为现场测试点,如图 8 a 所示。根据当地的地貌情况,本文研究的复杂地形为 B 类地貌,粗糙度系数为 0.16,梯度风高度为 350 m,粗糙度范围为 0.01~0.1 m,A1、B1 山的坡度为 0.2~0.4,为与前文研究简单的二维和三维 B 类地貌粗糙度的结果作为对比,所以选取粗糙度为 0.01、0.03、0.05 m。

从图 8b 可得出,风速随粗糙度的增大而变小,但变化幅度不是很大,且顶点变化幅度相对于迎风面和背风面上的变化幅度较小;其中测试点 18~23 模拟得出的风速随粗糙度的变化较小,与现场测试的数据接近。迎风面山脚到迎风面山腰与背风面山腰到背风面山脚的变化幅度较小,而迎风面山腰到山顶与山顶到背风面山腰变化幅度很大。粗糙度在 B 类地貌对风速的影响与简单二维和三维地形在 B 类地貌的影响结果是相似一致的。



a. 点位置

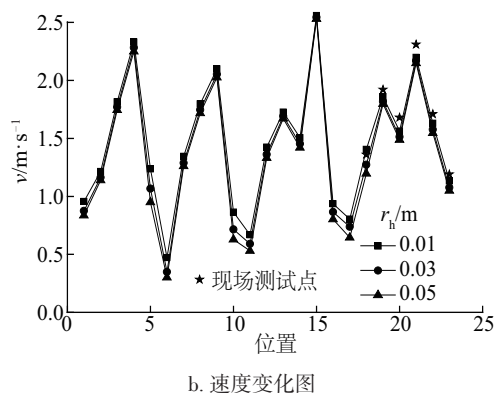


图8 不同位置的粗糙度下速度

Fig. 8 Speed of different roughness on different position

6 结 论

1)在复杂地形下采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型的模拟结果与现场实测数据误差较小。

2)在模拟简单二维和三维山体模型粗糙度的研究中,得出的结论是相似一致的,即坡度为 0.2、0.4、0.5、0.8、1.0 时,在 A、B 类中迎风面和背风面上的速度随粗糙度的增大而变小,在 C、D 类中迎风面和背风面上的速度随粗糙度的增大而变大,且变化幅度不大;顶点在 4 类地貌中随粗糙度的增大而变小,仅在 C 类地貌坡度为 0.8 和 1.0 时风速变化幅度较大,约为 10%。

3)实际案例地形处于 B 类地貌中的速度随粗糙度的增大而变小,且变化幅度不是很大,与简单二维和三维 B 类地貌粗糙度影响相似一致。

4)在模拟地形研究中地貌为 B、C、D 类时,粗糙度对迎风面和背风面的风速影响不大;若为 C 类地貌且坡度介于 0.8~1.0 之间,应考虑粗糙度对顶点风速的影响;坡度为 0.2, A 类地貌时应考虑粗糙度值。

[参考文献]

[1] Jackson P S, Hunt J C R. Turbulent wind flow over a low hill[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1975, 101(430): 929—955.
 [2] Farell C. Experiments on the wind tunnel simulation of atmospheric boundary layers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 79 (1-2): 11—35.
 [3] Ross A N, Vosper S B. Neutral turbulent flow over

forested hills[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2005, 131(609): 1841—1862.

- [4] 谢 东. 复杂地形条件下大气风场的三维数值模拟研究[J]. 南华大学学报, 2009, 23(3): 68—71.
 [4] Xie Dong. Three dimensional numerical simulation research on air flow field on complex terrains[J]. Journal of University of South China, 2009, 23 (3) : 68—71.
 [5] 邵文波. 风场复杂地形流动的数值模拟及微观选址[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
 [5] Shao Wenbo. Numerical simulation of flow over complex wind farm terrains and the microsite[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
 [6] 赵永锋, 康 顺, 梁思超. 复杂地形风场 CFD 模拟计算域的讨论[J]. 太阳能学报, 2015, 36(2): 355—361.
 [6] Zhao Yongfeng, Kang Shun, Liang Sichao. Discussion of CFD simulation computational domain of complex terrain wind farm[J]. Acta Energiv Solaris Sinica, 2015, 36(2): 355—361.
 [7] 郭文星. 复杂山地地形风场 CFD 多尺度数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
 [7] Guo Wenxing. CFD multi-scale simulation of wind flow over hilly terrain[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
 [8] 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.
 [8] Tang Ang. Study on characteristics of wind field in ground layer on actual canyon terrain[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2015.
 [9] 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.
 [9] Chen Shiling. The research of wind environment in near ground layer for mountainous city planning[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
 [10] 中国建筑学研究院主编. 中华人民共和国国家标准, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
 [10] Chinese Academy of Architecture. The national standard of the people's Republic of China, Code for load of building structures[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2006.
 [11] Weng Wensong, Taylor P A, Walmsley J L. Guidelines for air flow over complex terrain: model developments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 86(2): 169—186.

- [12] Kim Hyun Goo, Lee Choung Mook, Ltm H C, et al. An experimental and numerical study on the flow over two-dimensional hills [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 66(1): 17—33.

STUDY ON INFLUENCE OF ROUGHNESS ON WIND SPEED IN MOUNTAIN TERRAIN

Feng Lin¹, Fu Jun², Shi Honghui¹, Dong Ruoling¹, Zhang Lite¹

(1. *Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;*

2. *School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China*)

Abstract: The CFD method is used to study the influence on wind speed. At first, three-dimensional software is used to generate the model of a complex terrain of a real case, the comparison of simulation wind speed and actual wind speed is carried out at different measuring points of different turbulence models under southwest wind, and showing the error of Realizable $k-\varepsilon$ model is smaller. Then the effect of different roughness, slope and landform types on the wind speeds of simple two-dimensional, three-dimensional landforms and complex landform of actual case is simulated. The results show that in simple two-dimensional and three-dimensional landforms, the wind speeds on the windward and leeward faces in the A and B landforms becomes smaller as the roughness increases under the same slope, and the wind speeds for C and D landforms become larger; The wind speeds in the vertices of the four types of landforms become smaller as the roughness increases. In the complex landform, the wind speed decreases with the increase of roughness in the B landform, but the variation is not very large.

Keywords: CFD; turbulence model; roughness; mountain terrain; wind speed