

# 风特性参数对低矮房屋屋面局部 风压影响的数值分析

闫旭光,戴益民,刘也,王相军,邹思敏

(湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为获取低矮房屋屋面局部风压的分布规律,对体型比为1.5:1:1的双坡低矮房屋屋面划分若干典型区域并进行数值模拟研究.数值结果与风洞试验结果对比表明:2种研究手段分析结果吻合较好,验证了数值模拟技术在分析低矮房屋表面风压方面的可靠性.基于数值模拟,研究了不同风特性参数对低矮房屋屋面局部区域体型系数分布规律的影响,分析结果表明:来流风向对屋面各区域体型系数的影响是整体性的,且表现出一定规律性;湍流度对屋面各局部区域体型系数的影响不一,对迎风屋面前缘区域影响较大;风速对屋面局部区域体型系数影响较小.本文结论可为我国沿海多发台风地区低矮房屋抗台风设计提供依据.

**关键词:**计算风工程;低矮房屋;平均风压;风洞试验;湍流模型

**中图分类号:**TU312+.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-9102(2014)01-0047-06

## Numerical study of effects of wind characteristic parameters on local wind pressures on low – rise buildings

YAN Xu – guang, DAI Yi – min, LIU Ye, WANG Xiang – jun, ZOU Si – min

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to obtain the distribution of local wind pressures on roof of a low – rise building, the numerical simulation of a gable roof low – rise building with a 1.5:1:1 body type was performed based on the roof dividing several typical zones, compared with wind tunnel tests, the results obtained from the simulation match well, the reliability of the numerical simulation in analysis wind pressures of a low – rise building was verified. Based on numerical simulation, the distributions of local wind pressure on roof for different wind characteristics parameters were studied. Analysis results show that the wind direction has a whole effect on local wind pressure and show some regularity, Turbulence intensity has a different effect on local wind pressure, and has a great influence on areas of the windward roof; wind speed has a little effect on the local wind pressure. The research provides a foundation for the designing of low – rise building anti – typhoon in China’s coastal typhoon – prone regions.

**Key words:** computational wind engineering; low – rise building; mean wind pressure; wind tunnel test; turbulence model

近些年,台风登陆我国沿海地区的频次有所增高,被列为2006年度“十大自然灾害事件”中,台风灾害占据了四席,台风灾害造成的损失是巨大的.我国沿海地区分布着大量低矮型房屋,受台风

影响,这些低矮房屋破坏造成的损失超过总损失的半数.如:9417号台风对温州市低矮房屋的破坏尤为严重,损坏房屋约69.1万间,其中倒塌21万间<sup>[1]</sup>;2006年四起台风灾害共造成直接经济损失

680.8 亿元,其中房屋倒塌 70.6 万间,损坏 133.5 万间<sup>[2]</sup>。因此,针对我国沿海多发台风地区低矮房屋风特性研究具有重要的现实和社会意义。

目前,低矮房屋风荷载研究主要借助现场实测、风洞试验方法及数值模拟技术。全尺寸现场实测能够得到第一手资料,可靠性也是公认最好的,但存在着试验经费大、周期长、不宜进行大规模的模型参数分析,从而全面地掌握表面风压随各类房屋参数、场地参数等的变化规律等问题;风洞试验方法是现阶段建筑风荷载的主要研究手段,国内复杂建筑的设计都要求进行风洞试验以确定建筑风荷载情况,但风洞试验方法也存在一些物理问题,如几何缩尺比、雷诺数、高湍流度模拟等。随着计算流体力学在最近 20 年中的发展,数值模拟技术已成为研究建筑物风效应的一种有效方法。较之传统方法,数值模拟具有费用省、周期短、可视化程度高的特点,而且在多参数分析方面也有其独特优越性。

国内外学者开展了大量低矮房屋抗风数值模拟研究,并且得到一些有价值的资料。殷惠君<sup>[3]</sup>对 TTU 标准模型三维定常风场进行了数值模拟研究,并将计算结果与场地实测数据及风洞试验结果进行对比,重点研究了 CFD 技术运用于低矮建筑三维流场分析的可行性。顾明<sup>[4]</sup>等采用 RSM 湍流模型对一类带挑檐的低层双坡房屋屋面风压进行了数值模拟,研究了房屋外形因素(坡角、挑檐长度、檐口高度)对屋面风压的影响,得到一些有价值结论。已有的研究表明<sup>[5-7]</sup>,低矮房屋屋面角部、边缘和屋脊等区域的局部风压比屋面平均风压要大得多,其数值与来流风向有直接的关系,风灾中这些局部区域也是最先破坏从而导致建筑物的整体破坏。基于此,本文以 ANSYS 软件为平台,首先,对体型比为 1.5:1:1(长:宽:高)的低矮房屋(屋面坡度为 4.8°)进行了数值模拟,与已有风洞试验结果进行对比,验证数值模拟技术在分析低矮房屋表面风压方面的可靠性。进而,对该体型比低矮房屋在不同风特性参数下屋面局部风压分布规律展开了分析与研究,获得了低矮房屋屋面局部区域风压分布规律,研究结论可为我国沿海多发台风地区低矮房屋抗风设计提供有价值参考。

## 1 缩尺模型风洞试验

本文研究验证的风洞数据来自东京工艺大学风洞实验室所公布的数据库,实验室在风洞洞体为 2.2 m 宽、1.8 m 高的工作段进行的,双坡低矮房屋模型(坡角 4.8°)尺寸为 240 mm 长、160 mm 宽、

160 mm 高(屋檐高),体型比为 1.5:1:1(长:宽:高)。平均风速剖面指数为 0.2,边界层梯度高度为 450 m,其他试验参数见表 1,试验模拟风速及湍流度剖面<sup>[8]</sup>见图 1。

表 1 风洞试验参数

类型	缩尺比	速度比	时间比	湍流度	采样频率/Hz	风速/(m/s)
风洞	1:100	1:3	3:100	0.25(10 cm)	500	7.4(10 cm)
实测	—	—	—	—	15	22

说明:类型中的实测指的是风洞试验模型对应的实测环境参数

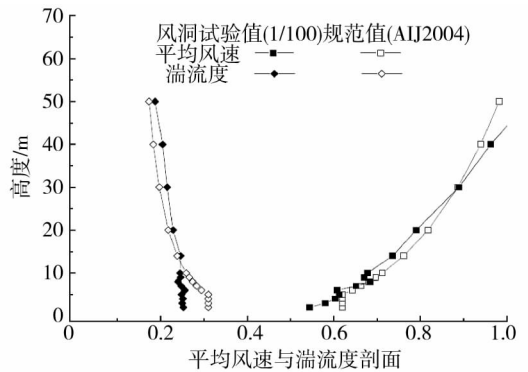


图 1 湍流度及风速剖面

## 2 全尺寸低矮房屋数值模拟

本文对体型比为 1.5:1:1 的双坡(坡角为 4.8°)低矮房屋进行全尺寸数值模拟分析,模型尺寸为 24 m × 16 m × 16 m ( $L \times B \times H$ ),其  $H$  指屋檐高度。考虑不同来流风向、不同湍流度及不同风速下屋面局部体型系数分布的数值分析。

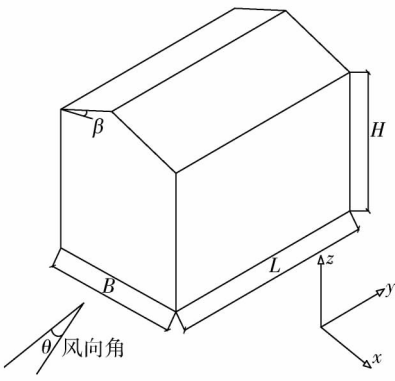
### 2.1 物理模型的建立与网格划分

数值模拟的计算域大小与计算精度密切相关,本文选取的计算域大小为:360 m × 160 m × 144 m。建筑物置于流域沿流动方向 1/3 处,此时,最大阻塞率满足模拟外部绕流场中小于 3% 的原则。

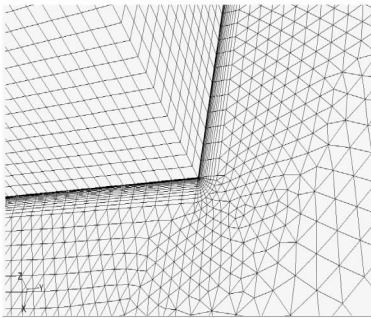
对于计算域的离散,采用混合网格离散方式,将计算域分为内外 2 部分:在模型附近的内部区域采用加密的网格形式,模型表面配合过渡的棱柱体网格;远离模型的外围区域采用六面体结构化网格离散,远离柱面的区域网格划分较稀疏。各模型网格总数在 170 万左右。45° 风向角计算工况的网格划分如图 2 所示。

### 2.2 模型测点设置

为获得低矮房屋屋面局部区域在不同风特性参数下表面风压的分布规律及其特性,对迎风屋面的角部、边缘和屋脊等区域进行分区,具体见图 3 所示。



(a) 房屋几何尺寸及风向定义



b) 网格划分局部放大

图 2 低矮房屋模型及网格划分

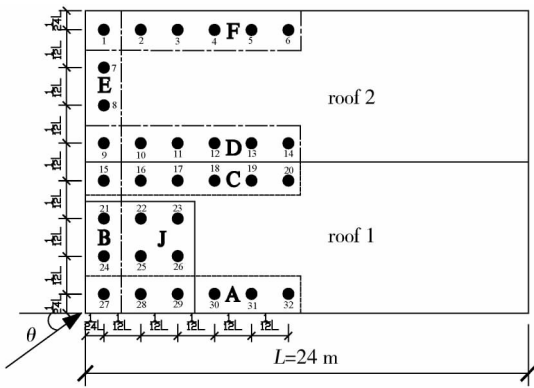


图 3 测点和风向角示意图

### 2.3 边界条件及参数设置

入口来流条件: 速度进口边界条件, 通过给定来流的平均速度剖面和湍流参数. 风速剖面参考我国《建筑结构荷载规范》(GB50009 - 2001), 采用指数率表达式模拟大气边界层速度剖面分布:

$$U(z) = U_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中,  $z_0, U_0$  为标准参考高度和标准参考高度处的风速. 根据实测环境参数取 10 m 标准参考高度风速为 22 m/s;  $U(z), z$  为流域中任意高度和对应的平均风速;  $\alpha$  为地面粗糙度指数, 取  $\alpha = 0.2$ . 平均风速剖面采用 UDF (用户自定义函数) 编程实现.

来流湍流特性通过直接给定湍动能  $k$  和湍流

耗散率  $\varepsilon$  的方式给定入流处湍流参数:

$$k = \frac{3}{2} (U(z) \times I)^2, \varepsilon = \frac{1}{l} \times 0.09 \frac{3}{4} k \frac{3}{2} \quad (2)$$

式中,  $l$  为湍流特征尺度. 风场模拟中, 我国现行规范还没有明确的湍流度要求, 本文湍流强度  $I$  采用日本建议的第 II 类地貌取值<sup>[9]</sup>:

$$I = \begin{cases} 0.23, & z \leq z_b; \\ 0.1 \left( \frac{z}{z_c} \right)^{-\alpha-0.05}, & z_b \leq z \leq z_c. \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\alpha = 0.20, z_b = 5 \text{ m}, z_c = 450 \text{ m}$ .  $k$  和  $\varepsilon$  同样采用 UDF 编程实现.

出口边界条件: 采用完全发展出流边界条件, 流场任意物理量沿出口法向的梯度为零, 即  $\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0$ .

建筑物表面和流场地面: 无滑移的壁面条件 (wall).

流域顶部和 2 侧: 对称边界条件 (symmetry), 即等价于自由滑移的壁面.

求解参数设置: 由于湍流模型对模拟稳定性及计算精度影响甚大, 本文选用 Realizable  $k - \varepsilon$  湍流模型, 采用非平衡壁面函数来考虑壁面的影响. 考虑到计算精度要求, 离散控制方程对流项采用二阶迎风格式, 流场中压力-速度耦合采用 SIMPLEC 算法, 计算至控制方程的相对迭代残量均小于  $10^{-4}$  以下且房屋表面平均风压力值基本不再变化, 即认为计算流场已稳定.

### 2.4 模拟结果及分析

建筑物表面风压通常用风压系数表示, 其定义为

$$CP_i = \frac{P_i - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2} \quad (4)$$

其中,  $P_i$  为作用在结构表面某点  $i$  的静压力;  $\rho$  为空气密度, 本文均取  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $U_{ref}$  为参考高度处 (本文为平均屋面高度) 远前方的平均风速;  $P_\infty$  为参考高速处远前方的静压.

本文对  $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  3 种典型来流风向工况数值模拟结果与已有风洞数据进行对比分析, 分析结果见图 4 ~ 图 6.

通过对比表明, 3 个典型风向角下屋面局部测点风压的数值模拟结果与风洞试验数据吻合较好, 靠近迎风屋沿、屋角分离处个别测点有所差异, 但差异较小. 其中, 风向角为  $0^\circ$ , 气流垂直于屋面短边, 在迎风屋面短边边沿形成强烈的气流分离而产生高吸力区 (B、E 区), 例如 T27, T1 风压系数达到  $-1.52$ , 离迎风屋面短边边沿越远, 风压越小; 风向角为  $90^\circ$  时, 气流垂直于屋面长边, 同样在迎风屋面长边边沿

区域产生高吸力区(A区),如T27风压系数分别达到-1.59;当斜风向时,迎风屋沿及角部区域平均风压变化较大,而远离这些区域的风压变化较小。这部分区域数值模拟结果与风洞值差异相对较大(例如

Tap29, Tap30),但误差在20%范围内。从对比图知,角部测点 Tap27 风压系数对比结果不理想,其吸力并非最大,而风压最大测点产生在频临角部测点(Tap29),这可以从钝体结构锥状涡流动理论解释<sup>[10-11]</sup>。

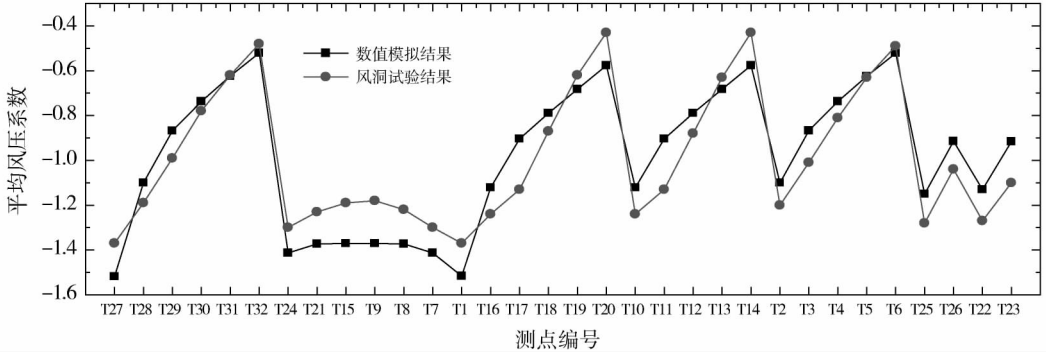


图4 屋面局部区域测点风压系数对比分析(0°风向角)

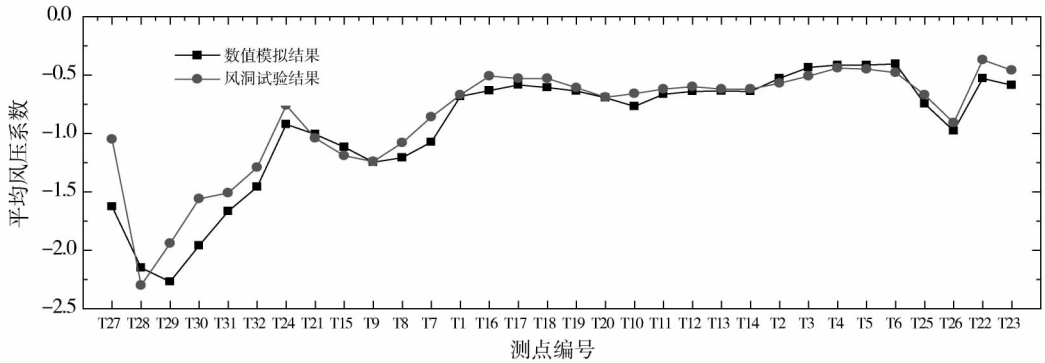


图5 屋面局部区域测点风压系数对比分析(60°风向角)

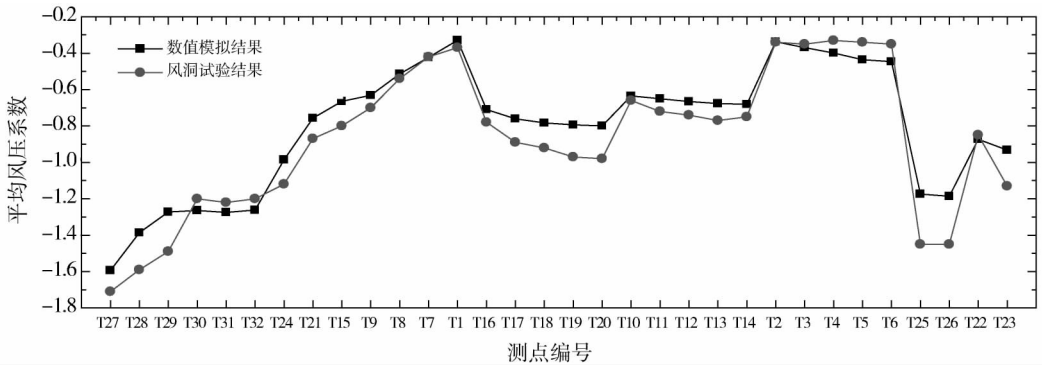


图6 屋面局部区域测点风压系数对比分析(90°风向角)

### 3 风特性参数对屋面局部风压影响的数值分析

为分析风特性参数对房屋屋面局部区域风压影响规律,考虑不同风向、不同湍流度、不同风速工况,分A,B,C,D,E,F,J7个区域分别对屋面迎风局部测点的风压变化规律展开研究。模型尺寸及分区同2.1,具体工况见表2(c为基本工况),各工况风速及湍流剖面符合指数率分布。

表2 模型计算工况( $z=10\text{ m}$ )

工况	风速/ (m/s)	湍流度/%	风向角/(°)
a	36.2	0.14	60°, 90°
b	28.5	0.20	60°, 90°
c	22.0	0.25	0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°
d	15.8	0.36	60°, 90°
e	8.2	0.40	60°, 90°

对于风压系数,我国规范采用面上的平均风压

系数描述,即体型系数. 为方便考虑屋面局部体型系数进行比较. 屋面局部体型系数定义为

$$\mu_s = \frac{\sum C_{pi} S_i}{\sum S_i} \quad (5)$$

其中,  $C_{pi}$  为屋面第  $i$  测点的平均风压系数;  $S_i$  为该测点所从属面积;  $\sum S_i$  为各局部区域总面积. 为对应屋面局部区域风压大小, 本文体型系数增大、减小均指其绝对值增大、减小.

### 3.1 来流风向对屋面局部区域体型系数的影响

图7给出了屋面局部体型系数随风向角的变化情况(c工况).

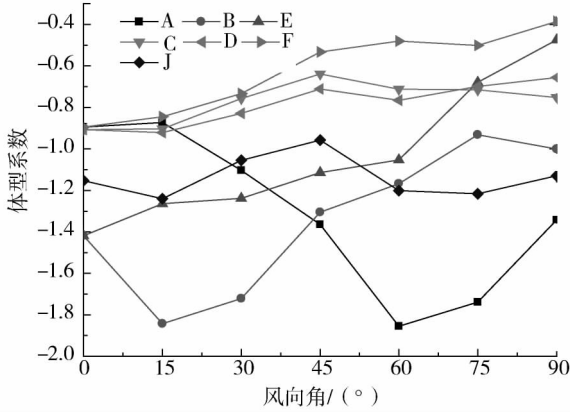


图7 屋面局部区域体型系数随风向角的变化

由图7,迎风屋檐A区与靠山墙B区体型系数以45°风向角为对称轴,说明了风向角的改变对低矮房屋的绕流特性,即来流风向为0°~45°时,靠山墙B区域各测点影响较大,气流在屋面短边边缘区域分离严重,当风向角在45°~90°范围内,同样,在屋面长边边缘流动分离严重,导致A区域各测点风压较大.0°~60°范围内,A区体型系数随风向增加而增大,60°~90°范围内随风向角的增大而减小,在60°风向时达到最大,体型系数为-1.84;B区域在15°风向达到最大,体型系数为-1.85.背风屋面靠山墙E区域,整体上随着风向角的增加体型系数逐渐减小.迎风屋脊C区及背风屋脊D区体型系数随风向的增大呈现相同的变化,且变化平缓,说明气流主要在迎风屋面边缘发生分离,随着距迎风屋面前缘越远气流趋于均匀.背风屋面F区体型系数随风向的增大呈现减小的趋势,而迎风屋面角部区域(J区)体型系数在风向角15°,60°较大,该区域体型系数变化范围不大.

### 3.2 不同湍流度对屋面局部区域体型系数的影响

图8给出了屋面各区域体型系数随湍流度的变化.

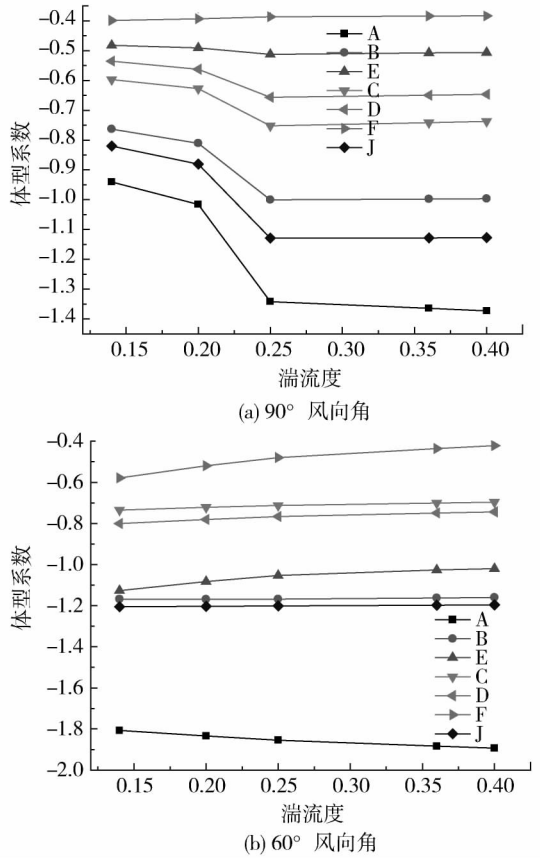


图8 屋面局部区域体型系数随湍流度的变化

由图8(a),90°风向时,屋面各区域(除背风屋面F区域及靠山墙E区域)在湍流度小于25%时表现相同的变化趋势,即随湍流度的增大,体型系数相应增大,随着湍流度的进一步增大,迎风屋檐A区体型系数略微增大,B,J区域变化平缓,基本处于水平位置,C,D区体型系数略微减小.背风屋面屋檐F区域及靠山墙E区域随湍流度变化不大.说明气流垂直屋面长边时,湍流度的影响在迎风屋面区域较为显著,而背风屋面局部影响较小.来流风向为60°时,整体上,各局部区域体型系数变化平稳,迎风屋檐A区随湍流度的增大略微增大,而迎风B,J区域则基本处于水平,迎风屋脊C区及背风屋脊D区测点风压随湍流度的增大呈现相同的变化趋势,略有减小,背风屋面F,E区体型系数随湍流度的增大而减小.

### 3.3 不同风速对屋面局部区域体型系数的影响

图9给出了屋面各区域体型系数随风速的变化.

由图9(a),90°时,迎风屋檐A区体型系数随风速增加减小明显,风速为8.2 m/s时达到最大,体型系数为-1.77.靠山墙B区及迎风屋角J区体型系数随风速增加变化趋势相同,其他各区域体型系数在风速为22 m/s之前变化趋势一致,而后随着风速的

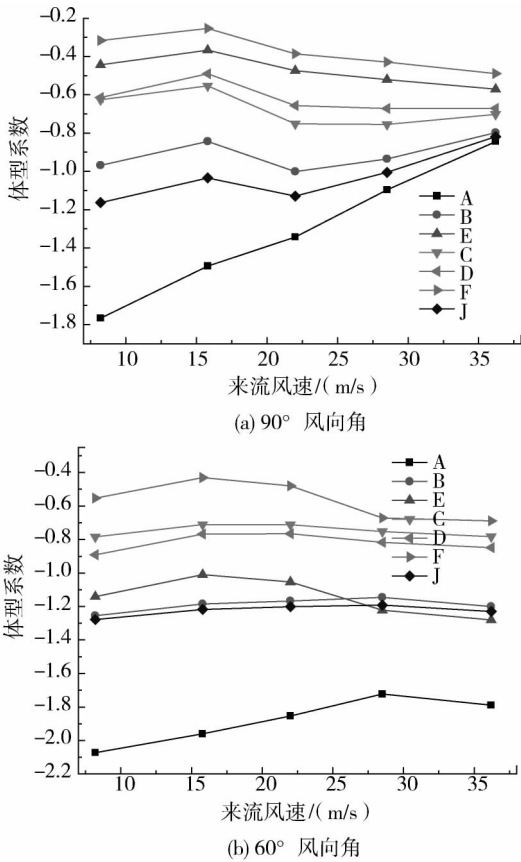


图9 屋面局部区域体型系数随风速的变化

增大由屋面屋脊 C、D 区体型系数略为减小到背风屋面 F、E 区体型系数逐渐增大。由图 9(b), 60° 时, 迎风屋檐 A 区体型系数随风向增加, 整体上表现减小趋势。在风速为 8.2 m/s 时, 达到最大, 体型系数为 -2.07。靠山墙 B 区及迎风屋角 J 区体型系数随风速增加变化趋势相同, 且变化平缓。迎风屋脊 C 区及背风屋脊 D 区测点风压随风向的增大变化趋势一致, 而背风屋面屋檐 F 区及靠山墙 E 区域体型系数随风速增大变化趋势一致。

## 4 结论

本文针对体型比为 1.5:1:1(长:宽:高)的双坡低矮房屋进行数值模拟研究, 通过对比已有风洞试验数据, 验证了数值模拟结果的可靠性。进而, 对该体型比低矮房屋在不同风向角、不同风速及不同湍流度下屋面局部体型系数变化规律展开研究, 其结论可为我国低矮房屋的设计提供有价值的参考。

1) 来流风向对屋面局部风压影响较大, 低矮房屋主要在斜风向影响下, 气流在迎风屋面棱角处气流分离和涡脱落严重从而导致该区域形成高负压区, 其吸力值远大于垂直风向影响。

2) 不同风向下, 湍流度对屋面局部区域体型系数的影响不一。垂直风向时, 湍流度对迎风屋面

前缘各区域影响较大, 随湍流度的增大, 体型系数相应增大, 对背风屋面局部区域体型系数影响较小; 斜风向时, 湍流度对屋面局部区域体型系数的影响不明显。

3) 不同风速下, 屋面各局部区域体型系数变化范围较小, 只在迎风屋面前缘气流流动分离出影响明显。

4) 屋面局部风压随风向角的改变而变化明显, 因此, 在低矮房屋风荷载取值时, 需要考虑气流分离及再附着引起的压力峰值的影响, 即低矮房屋抗风设计需要考虑风向角对屋面风压的影响。

## 参考文献:

- [1] 孙炳楠, 傅国宏, 陈鸣, 等. 9417 号台风对温州民房破坏的调差[C]//第七届全国结构风效应会议论文集. 重庆: 重庆大学出版社, 1995.
- [2] 2006 年全国十大自然灾害事件[J]. 中国减灾, 2007(1): 28-31.
- [3] 殷惠君, 张其林, 周志勇. 标准低矮建筑 TTU 三维定常风场数值模拟研究[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 139-145.
- [4] 顾明, 黄强, 黄鹏, 等. 低层双坡房屋屋面平均风压影响因素的数值模拟研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 205-211.
- [5] Kareem A, Kijewski T. 7<sup>th</sup> US national conference on wind engineering; a summary of papers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 62: 81-129.
- [6] Case P C, Isyumov N. Wind loads on low buildings with 4:12 gable roofs in open country and suburban exposures [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 77/78: 108-118.
- [7] Holmes J D. Wind pressure on tropical housing[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 53(1/2): 105-123.
- [8] Ying S, Yukio T, Yong Q. The interference effect of surrounding roughness on wind pressures of rectangular prism[R], Milano, 2008: 20-24.
- [9] Architectural Institute of Japan. AIJ recommendations for loads on buildings [S]. Tokyo, Japan: Architectural Institute of Japan, 2004.
- [10] Richards P J, Hoxey R P. Wind loads on the roof of a 6m cube [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008(96): 984-993.
- [11] Endo M, Bienkiewicz B, Ham H J. Wind-tunnel investigation of point pressure on TTU test building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006(94): 553-578.