

# 屋脊及出山构造影响低矮建筑屋面 风压特性研究

戴益民\*, 雷静敏, 刘也, 高阳

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201;  
湖南科技大学 结构抗风与振动控制湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**基于 Fluent RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型,以风向角为变量,研究屋脊和出山高度变化影响无屋脊硬山、有屋脊硬山、无屋脊出山和有屋脊出山等4类屋面的风压变化规律.结果表明:来流风向对4种屋面风压影响明显,屋脊高度在0.00~0.24 m时,迎风屋面平均风压明显增大,而随着屋脊的继续增高(0.24~0.36 m),迎风区体型系数也进一步增大;出山的存在可减轻山墙端风压,而出山的高度变化对屋面风压的影响较小.

**关键词:**低矮建筑;数值模拟;屋脊;出山;平均风压

中图分类号:TU312.1 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2018)02-0022-07

## Research of Wind Pressure on the Roof of Low-rise Buildings Influenced by Ridge and Protruding Gable Wall Structures

Dai Yimin, Lei Jingmin, Liu Ye, Gao Yang

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
Hunan Provincial Key Laboratory of Structures for Wind Resistance and Vibration Control,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Based on the Fluent RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model, the wind angle was used as variables to study the variation of ridge and protruding gable wall height effects on law of roof pressure of four types of roofs, which were roofs with flush gable wall and with/without ridge, and roofs with protruding gable wall and with/without ridge. The results show that the wind direction of flow effect on wind pressure of four types of roofs obviously, ridge height from 0.00~0.24 m, the mean wind pressure of the windward side of roof increases obviously, and as the ridge continue to glow(0.24~0.36 m), the shape coefficient of windward area also has further increase. The existence of protruding gable wall reduces the wind pressure of the roof gable ends. However, the variation of the height of protruding gable wall affects the roof pressure slightly.

**Keywords:** low-rise buildings; numerical simulation; ridge; protruding gable wall; mean wind pressure

我国东南沿海城市频受台风影响,历次风灾都会带来巨大的财产损失和人员伤亡.李秋胜<sup>[1]</sup>等通过对强台风“黑格比”的现场实测,获得了屋面风压的分布规律;宋芳芳<sup>[2]</sup>等对台风“黑格比”过后的湛江市和茂名市进行了实地考察,指出屋面拐角、屋檐、屋脊处在台风中容易受损;Banks D<sup>[3]</sup>和 Wu F<sup>[4]</sup>研究表明:在斜风向作用下,迎风屋面角部边缘区域受锥形旋涡、气流分离的影响会产生较大局部峰值负压,使得这些区域在强风作用时容易破坏.在建筑抗风上,屋面细部构造(如檐口、屋脊和出山)是影响屋面风压的因

收稿日期:2015-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578237)

\*通信作者,E-mail:617275190@qq.com

素之一<sup>[5-6]</sup>,因此对于这些构造的研究具有十分重要的意义.而我国对于低矮建筑檐口构造已有相关研究,王辉、陈水福等<sup>[7]</sup>对低矮双坡屋面带挑檐建筑进行了数值模拟研究;赵雅丽<sup>[8]</sup>等研究了4种不同挑檐形式对低矮双坡屋面风荷载的影响;周绪红、聂少锋等<sup>[9]</sup>运用数值模拟方法研究了挑檐的出挑长度对屋面风压系数的影响.虽然陶玲<sup>[5,10]</sup>和黄鹏<sup>[6]</sup>通过风洞试验对低矮建筑屋面屋脊和出山构造进行了相关研究,但针对不同低矮房屋结构的研究还相对较少.

本文以长宽比为1.5:1建筑模型为研究对象,基于Fluent 6.3 RNG k- $\epsilon$ 湍流模型对其进行了CFD数值模拟验证.以风向角为变量,研究了无屋脊硬山屋面、有屋脊硬山屋面、无屋脊出山屋面和有屋脊出山屋面的局部风压规律.

## 1 风洞试验数值模拟验证

### 1.1 建模和网格划分

本文选取日本东京工业大学风洞实验室尺寸为24 m(L)×16 m(B)×12 m(H)的模型,建立16L×9B×10H的数值风洞验证数值模拟的可靠性,其中H,L,B分别为房屋檐口高度、长度、宽度.模型位于计算流域上游5L处,并满足阻塞率小于3%的要求.

网格划分采用混合网格离散方式,计算域划分成内外2部分:模型附近网格较密,采用四面体单元离散,局部网格如图1所示;模型外部区域采用六面体结构化网格划分,沿远离模型方向渐疏,各个模型整体网格数量控制在140万左右.为获得低矮建筑屋面局部区域在不同风向下表面风压的分布规律及其特性,将屋面角部、檐口边缘和屋脊区域进行分区,设定以平行屋脊线方向为0°风向角,具体测点编号和分区如图2所示.

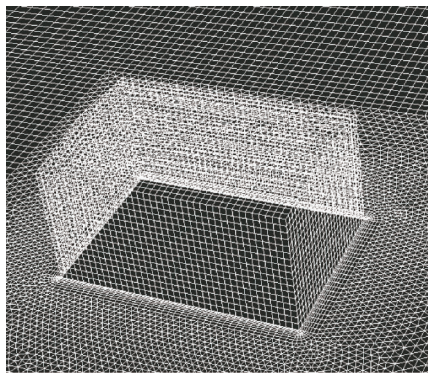


图1 0°风向角4.8°坡角局部网格

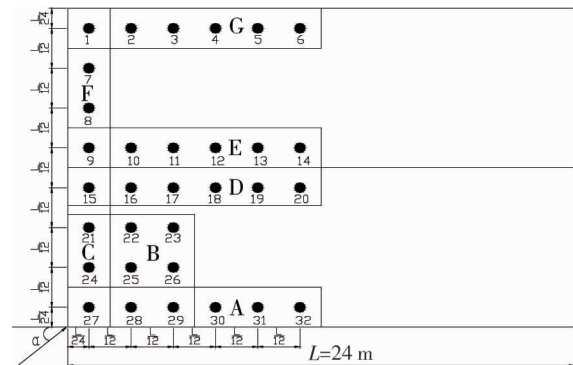


图2 建筑屋面测点布置

### 1.2 边界条件和参数设定

入流面采用速度进口(velocity-inlet),出流面采用完全发展出流(outflow),流域底面和建筑物表面采用无滑移壁面(wall),流域其他侧面采用自由滑移壁面(symmetry).场地根据日本风荷载规范建议的第III类地貌取值.入流边界条件采用指数率平均风速剖面表达式<sup>[11]</sup>:

$$U(z) = U_r \left( \frac{z}{z_r} \right)^\alpha.$$

式中: $\alpha$ 为地面粗糙度指数,取0.2; $z_r, U_r$ 分别为标准参考高度和标准参考高度处的平均风速,取10 m和22 m/s.湍流参数由湍流动能 $\kappa$ 和湍流耗散率 $\epsilon$ 给定:

$$\kappa = 3/2 (U(z) \times l)^2; \epsilon = \frac{1}{l} \times 0.09^{0.75} \times \kappa^{1.5}.$$

式中: $l$ 为湍流强度; $l$ 为湍流积分尺度.根据日本规范<sup>[12]</sup>:

$$I = \begin{cases} 0.31, & z \leq z_b; \\ 0.1 \times \left( \frac{z}{z_G} \right)^{-\alpha-0.05}, & z_b < z < z_G. \end{cases}$$

$$l = 100 \left( \frac{z}{30} \right)^{0.5}.$$

式中:  $z_b = 5 \text{ m}$ ;  $z_c = 450 \text{ m}$ .

本文选用的湍流模型为 RNGk- $\epsilon$  湍流模型能较好的预测复杂剪切流动、含高剪切率的流动、旋流和分离流场合<sup>[13]</sup>.在模拟中采用二阶离散格式求解,压力-速度耦合选用 SIMPLE 算法,控制方程相对迭代残余量小于  $10^{-4}$ .

本文中的风载体型系数定义式为

$$\mu_s = \frac{\sum_i C_{pi} A_i}{\sum_i A_i}$$

式中:  $A_i$  为各区域内各测点所属面积;  $C_{pi}$  为各测点风压分布系数,定义为

$$C_{pi} = \frac{P_i - P_\infty}{0.5\rho V_{ref}^2}$$

式中:  $P_i$  为结构表面某点  $i$  处的风压;  $\rho$  为空气密度,取  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $V_{ref}$  为参考高度处的风速(其中验证模型中的参考高度为屋面的平均高度,其他模型参考高度均取  $10 \text{ m}$ );  $P_\infty$  为来流未受干扰参考高度处的风压,风压符号定义压力向下为正,向上为负.

### 1.3 模拟结果和分析

本文对  $4.8^\circ$  屋面坡度下  $0^\circ, 15^\circ$  风向角来流工况进行了数值模拟,并与日本东京工业大学风洞试验数据进行对比分析,对比结果如图 3 所示.

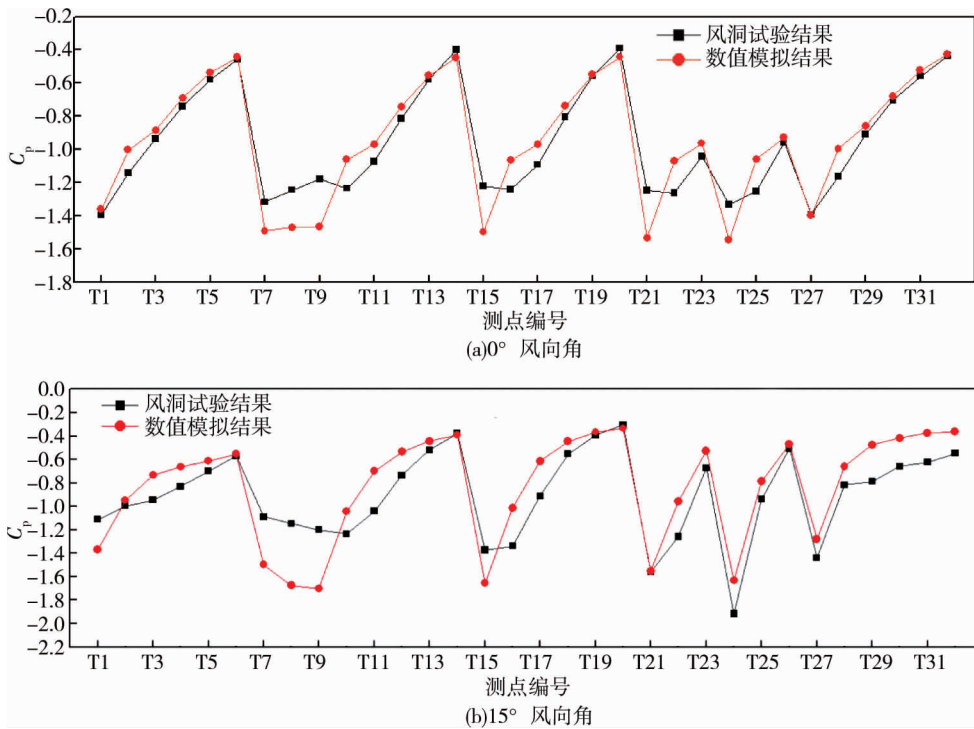


图 3  $4.8^\circ$  坡角屋面局部测点平均风压系数对比

从风洞试验和数值模拟的对比可以看出:在 2 个风向角下,数值模拟出屋面局部测点平均风压系数与风洞试验得出的数据较为吻合,能较好的反映屋面风压分布情况.在  $0^\circ$  风向下,迎风山墙区域测点(C, F 区)与风洞试验相差较大,但是误差控制在 15% 以内;  $15^\circ$  风向的模拟结果较差一些, F 区域测点的误差相比其他区域要大.分析可能原因:气流在迎风角部产生较为剧烈的分离和漩涡脱落,然而数值模拟是一种理想化模拟,因此很难完全模拟出实际风场中的锥状涡流动.

## 2 屋脊和出山对屋面风压影响的数值模拟

### 2.1 模型和基本参数

采用的模型尺寸与之前数值模拟验证的模型一致,坡角为  $30^\circ$ .边界条件的设定和各参数的设定均与

之前的验证模拟一致,网格总数控制在 140 万左右.测点布置和屋面分区如图 4,屋脊和出山构造图如图 5 所示,屋脊和出山厚度分别为 0.12 及 0.18 m,基本工况如表 1 所示.

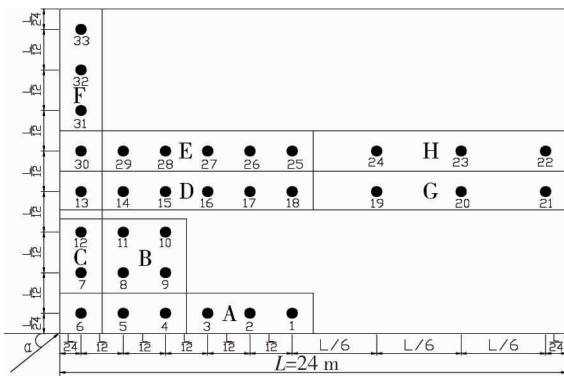


图 4 屋面测点布置及分区

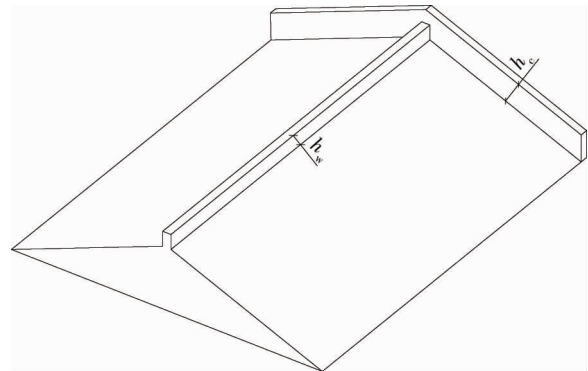


图 5 屋脊和出山构造(只画出一边)

表 1 模拟工况表

屋面类型	屋脊高 $h_w$	出山高度 $h_c$
无屋脊硬山屋面	0.00	0.00
有屋脊硬山屋面	0.24/0.36	0.00
无屋脊出山屋面	0.00	0.24/0.36/0.54
有屋脊出山屋面	0.24	0.24/0.36/0.54
	0.36	0.36/0.54

## 2.2 模拟结果和分析

### 2.2.1 屋脊对屋面风压的影响规律

模拟了无屋脊硬山屋面和有屋脊硬山屋面 2 种工况,得出在  $0^\circ$  和  $45^\circ$  风向时,屋脊高度为 0.00, 0.24, 0.36 m 时屋面风压的风载体型系数,结果如图 6 和图 7 所示.

如图 6a 所示,当风向平行屋脊方向时,有屋脊硬山屋面与无屋脊硬山屋面各区体型系数基本一致,并且屋脊高度增加对屋面风压的影响较小.在  $45^\circ$  风向下,对比图 7a 和 7b,可以看出:屋脊对屋面风压的影响较为明显,屋脊的存在(0.00 ~ 0.24 m)增大了屋面迎风区域风压,并使得背风区靠近来流山墙区域的平均负压有增大现象.对比屋面体型系数,迎风区体型系数增大区间为 0.083 ~ 0.476,变化最大的区域为 D 区,屋面风压体型系数由 -0.280 变为 0.196,增大了 1.7 倍.背风区域 E, F 的体型系数负值增大,影响最小的为 H 区域;当屋脊高度增大(0.24 ~ 0.36 m)时,屋面风压的变化相对较小,背风区域靠近来流山墙端屋脊附近区域风压系数有减小趋势,但背风区其他区域负压系数有增大现象.迎风区域的风载体型系数进一步增大,增大区间为 0.025 ~ 0.124,而背风区体型系数变化不大.

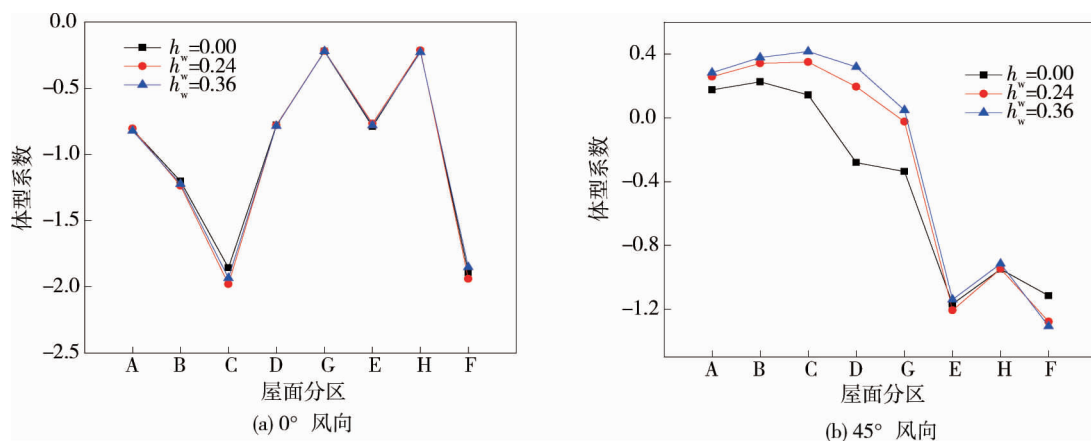


图 6 屋脊高度变化时屋面各区体型系数曲线

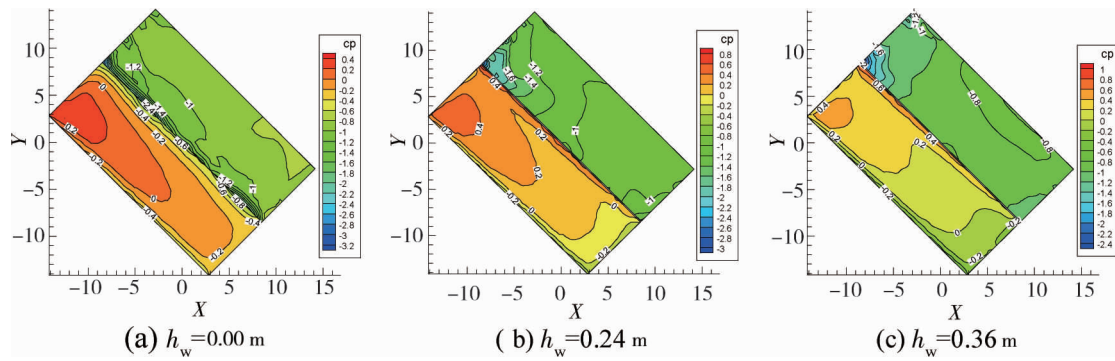


图7 屋脊高度变化时屋面风压系数等值线(45°风向)

### 2.2.2 出山对屋面风压的影响规律

模拟了无屋脊硬山屋面和无屋脊出山屋面 2 种工况,得出在 0°和 45°风向时,出山高度为 0.00,0.24, 0.36,0.54 m 时屋面风压的分布特点,其模拟结果如图 8 和图 9 所示.

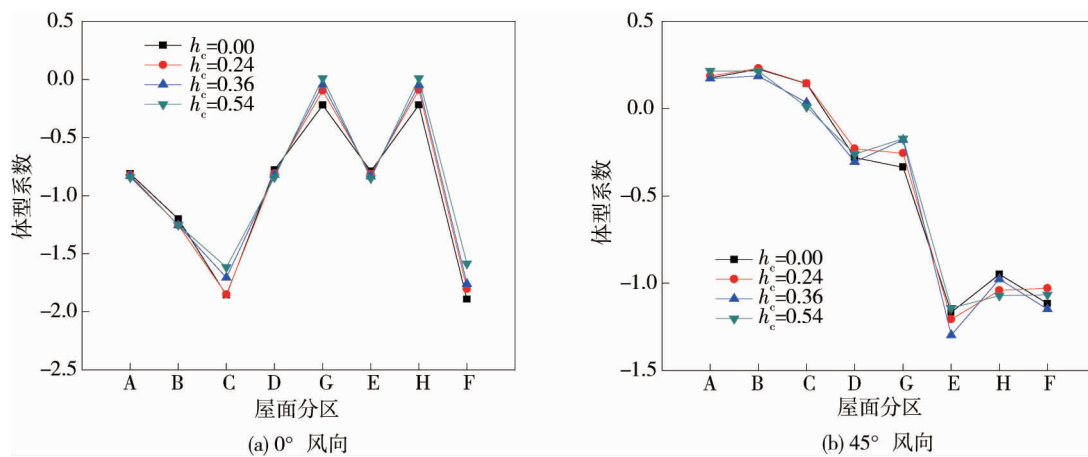


图8 出山高度变化时屋面分区体型系数曲线

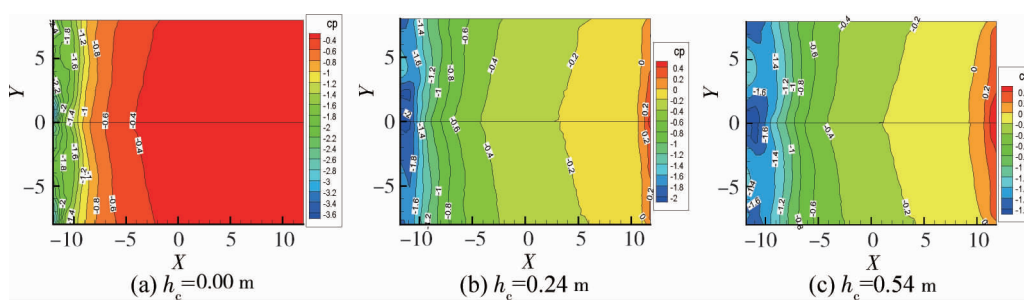


图9 出山高度变化时屋面风压系数等值线(0°风向)

0°风向下,出山对屋面风压的影响较小,主要影响靠近山墙部位,有出山屋面在靠近远 come 流山墙区出现正压.出山高度从 0.00~0.24 m,屋面 A,B,C,D,E 区体型系数与无出山屋面十分相近,几乎可以忽略.而在 G,H,F 区间体型系数有所减小,减小区间为 0.089~0.130,减小幅度为 4.7%~59.1%,影响较大的是 H 区域;出山高度增大时(0.24~0.54 m),A,D,E 区体型系数也随之增大,但在 C,G,H,F 区域,体型系数随之减小,当出山高度达到 0.54 m 时,G,H 区域体型系数接近 0.

斜风向下,出山高度从 0.00~0.24 m,E,H 体型系数均有不同幅度的增大,而 D,G,F 区域的体型系数有所减小,在 A,B,C 区域的影响十分小;当出山高度增加时(0.24~0.54 m),屋面风压分布并未呈现规律



变化.出山高度为 0.36 和 0.54 m 时,屋面 A,B,C,D,G 区域的体型系数十分接近.

### 2.2.3 屋脊和出山组合作用对屋面风压的影响规律

模拟了无屋脊硬山屋面和有屋脊出山屋面 2 种工况,得出在 0° 和 45° 风向时,屋脊和出山组合作用影响屋面风压规律,结果如图 10 和图 11 所示.

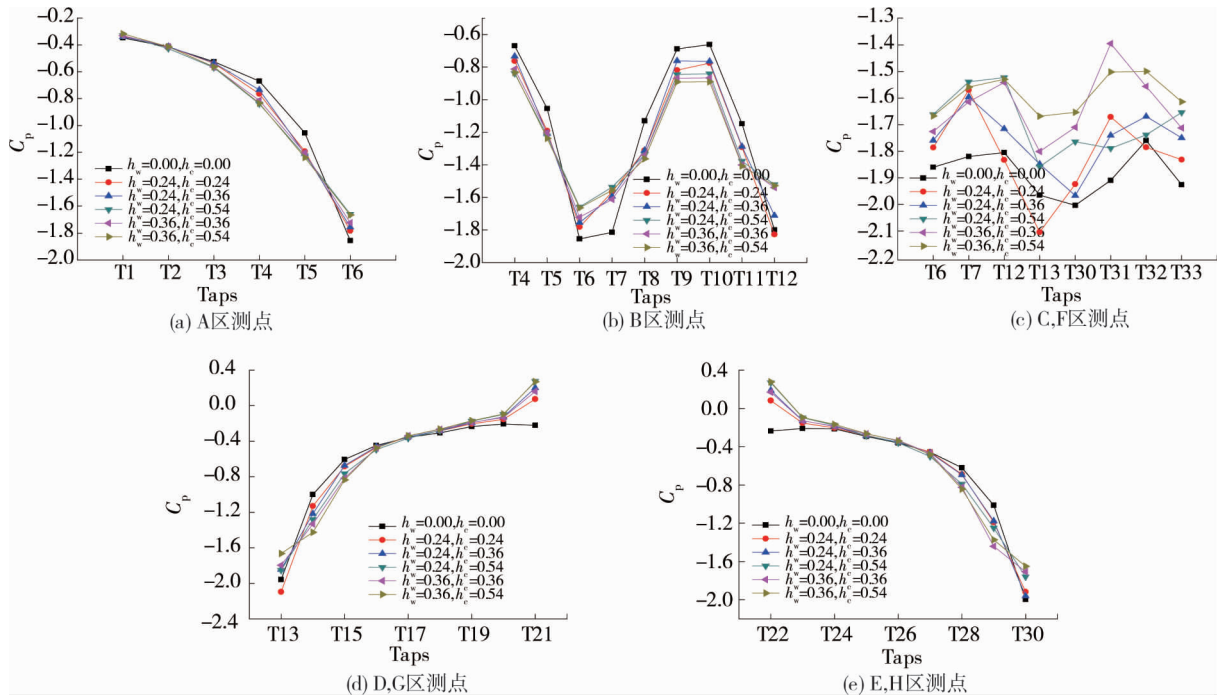


图 10 有屋脊出山屋面测点平均风压系数曲线(0° 风向)

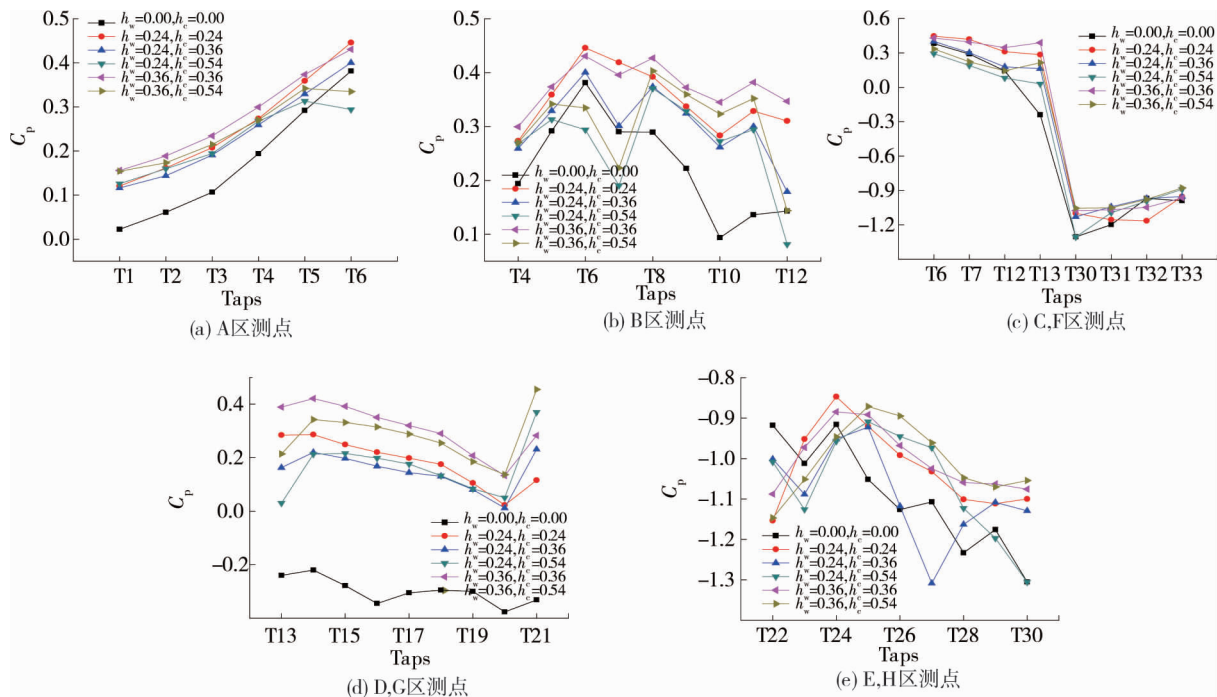


图 11 有屋脊出山屋面测点平均风压系数曲线(45° 风向)

1) 0° 风向.此风向角下,有屋脊出山屋面测点风压系数曲线与无屋脊硬山屋面较为相近.有屋脊出山屋面风压在此风向下主要受出山的影响,而屋脊对于其屋面风压的作用较小,平均风压系数在 D,G,E,H

区域呈现对称分布.由图 10c 看出:有屋脊出山屋面相比无屋脊硬山屋面在靠近来流山墙区的整体负压系数减小,当屋脊高度为 0.36 m,出山高为 0.54 m 时对减小 C, F 区负压较其他屋面更为有效.但在靠近 C, F 区域测点(如 4, 5, 8, 9, 10, 11 等)的负风压系数值增大.当屋脊高度分别为 0.24 和 0.36 m 时,出山高度的变化仅对屋面个别测点有较小影响.

2) 45°风向.此风向角下,屋脊和出山对屋面风压的影响均发挥作用,对比图 11 各区域测点风压系数,可看出:有屋脊出山屋面风压系数在迎风屋面大部分区域较无屋脊硬山屋面要大.屋脊高度为 0.36 m,出山高度为 0.36 m 时,屋面迎风区压力系数整体上比其他屋面大;当屋脊高度为 0.24 m 时,随着出山的高度增加, B, C 区测点风压系数随之减小;屋脊高度为 0.36 m 时,随着出山高度的增加,屋面迎风部位 A, B, C, D 区的压力作用减弱.

### 3 结论

1) 风向平行屋脊时,屋脊的存在对气流的阻挡作用几乎可以忽略.斜风向,屋脊对屋面风压影响较大,有屋脊屋面增大了屋面迎风区风压,屋脊高度为 0.24 m 时,屋面 D 区体型系数增大较为明显,增大了 0.476.随着屋脊高度(0.24~0.36 m)的增大,迎风区风压也随之增大,但是变化相对较小.

2) 出山对屋面风压的影响较小,有出山屋面一定程度上减小了靠近来流山墙区负压作用,并使得靠近远离来流山墙区出现正压.而出山的高度增大(0.24~0.54 m)对屋面风压的影响十分小.

3) 有屋脊出山屋面风压受风向角影响明显.0°风向下,有屋脊出山屋面在屋脊高为 0.36 m,出山高为 0.54 m 时对减小 C, F 区负压较其他屋面更为有效.45°风向时,有屋脊出山屋面风压系数在迎风屋面大部分区域较无屋脊硬山屋面要大.

#### 参考文献:

- [1] 李秋胜,戴益民,李正农.强台风“黑格比”作用下低矮房屋风压特性[J].建筑结构学报,2010,31(4):62-68.
- [2] 宋芳芳,欧进萍.台风“黑格比”对城市建筑物破坏调查与成因分析[J].自然灾害学报,2010,19(4):9-17.
- [3] Banks D, Meroney R N, Sarkar P P, et al. Flow visualization of conical vortices on flat roofs with simultaneous surface pressure measurement[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 84(1):65-85.
- [4] Wu F, Sarkar P P, Mehta K C, et al. Influence of incident wind turbulence on pressure fluctuations near flat-roof corners[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(5):403-420.
- [5] 陶玲,黄鹏,全涌,等.屋脊和出山对低矮房屋屋面风荷载的影响[J].工程力学,2012,29(4):113-127.
- [6] 黄鹏,陶玲,全涌,等.檐沟对低矮房屋屋面风荷载的影响[J].工程力学,2013,30(1):248-254.
- [7] 王辉,陈水福,唐锦春.低层房屋风压分布特性的模拟与分析[J].计算力学学报,2004,21(3):272-276.
- [8] 赵雅丽,全涌,等.典型双坡屋面风压分布特性风洞试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(11):1586-1592.
- [9] 周绪红,聂少峰,周天华,等.低层双坡屋面建筑三维定常风场的数值模拟[J].工程力学,2010,27(3):19-29.
- [10] 陶玲,黄鹏,顾明,等.低矮房屋屋面细部构造的风荷载特性研究[J].建筑结构学报,2012,33(1):65-71.
- [11] 何艳丽.空间结构风工程(第一版)[M].上海:上海交通大学出版社,2012.
- [12] Architectural Institute of Japan. AIJ Recommendations for Loads on Buildings[S]. 2004.
- [13] 李鹏飞,徐敏义,王飞飞.精通 CFD 工程仿真与案例实战(第一版)[M].北京:人民邮电出版社,2011.