

# 檐口构造对四坡低矮房屋屋面风压分布影响规律的数值模拟研究\*

戴益民 邹思敏<sup>†</sup>

(湖南科技大学土木工程学院,湘潭 411201)

**摘要** 基于日本东京工业大学风洞试验数据,针对低矮四坡房屋展开研究,验证了 RNG 模型对四坡低矮建筑表面风压研究的可靠性.利用此模型深入研究檐口外伸长度与出挑高度对四坡低矮屋面表面风压的影响规律.结果表明:檐口的长度及出挑高度对屋面风压影响明显,当檐口外伸长度不变,随檐口竖向高度增加,迎风面风吸力随之增大,当檐口竖向高度不变,高度为 0.5m、1.0m 时,随着檐口外伸长度的增加,迎风面负风压减小,檐口外伸长度为 1.5m,竖向高度为 1.0m 为最有利于房屋表面抗风设计,结论可为台风多发地区低矮民居设计提供建议.

**关键词** 计算流体力学, 四坡低矮房屋, 数值模拟, 檐口, 屋面风压

DOI: 10.6052/1672-6553-2015-002

## 引言

四坡低矮建筑主要用于庭院、亭子及民居,此类建筑在强风作用下主要表现为屋面破坏,而我国又是台风登陆频繁国家,所以有必要对四坡低矮建筑强风所致破坏展开研究.

李秋胜等<sup>[1]</sup>根据强台风“黑格比”登录过程中的实测数据与分析,采用现场实测的方法得出屋面平均、脉动及极值风压系数的规律,且建筑模型为平屋面;陶玲等<sup>[2]</sup>通过研究低矮房屋屋面是否添加屋脊和出山对屋面风荷载的影响,得出有屋脊和出山屋面是对低矮房屋抗风最有利的屋面形式;谢壮宁等<sup>[3]</sup>分析了模型尺寸变化对平均、脉动风压系数和堵塞特征的影响;顾明等<sup>[4]</sup>通过对我过沿海地区较常见的带挑檐的低层双坡建筑的屋面风进行了数值模拟,研究了对屋面平均风压产生影响的因素;宋芳芳<sup>[5]</sup>对双坡屋面低矮房屋风致内压进行了数值模拟,表明房屋开洞对风致内压的影响.陈水福等<sup>[6]</sup>采用数值方法对四坡屋面的风荷载进行了数值分析,屋面坡角和风向角对四坡屋面房屋的屋面风压具有显著影响,在不同风向角下的峰值压力一般都出现在屋脊或迎风屋檐附近;屋脊处的峰值吸力绝对值随着坡角增加而增大,迎风屋檐处的

峰值吸力随着坡角增加而减小;黄敏谦等<sup>[7]</sup>对低矮房屋的四坡屋面风压体型系数进行了数值计算,分析不同风向角下,房屋坡度与檐口对四坡屋面风压体型系数的分布影响,得到坡角较小时,带有檐口的四坡屋面风压体型系数会比无檐口工况时的小有利于此类建筑的抗风;焦燊烽等<sup>[8]</sup>采用数值模拟方法,结合风洞模型试验对两栋低层四坡屋面房屋周围的风场及表面风压进行了计算和分析,得到四坡屋面房屋周围有干扰,且风向垂直于屋面时,屋面迎风处是受扰比较严重的区域,在实际工程设计中,需要增大此部位的体型系数,以减小在台风等恶劣风环境下对屋面的破坏.

综上所述文献可以看出,目前对于低矮房屋研究主要集中对平屋顶、单坡和双坡屋面,房屋的风压分布都有了较多分析与深入的研究,且目前我国现行的《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)<sup>[9]</sup>虽然对一些屋面类型如单坡、双坡屋面房屋的平均风荷载体型系数有对应的规定,但是对四坡屋面却几乎没有.

本文拟利用 CFD 数值模拟结果与日本东京工业大学的风洞试验数据进行对比,开展檐口外伸长度与出挑高度变化对四坡屋面风压变化规律展开研究.

2014-07-08 收到第 1 稿,2014-10-20 收到修改稿.

\* 交通运输部重大科技项目(2011318824140),广西防灾减灾与结构安全重点实验室开放课题(2013ZDK 06),湖南省教育厅(13K088)资助项目  
<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: zsm199024@163.com

### 1 本文数据模拟研究风场验证

本文数值模拟对比数据来源于日本东京工业大学风洞试验中同体型比的四坡低矮房屋, (<http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp>) 其风洞试验段宽 2.2m, 高度为 1.8m 且本试验长度比例为 1:100, 风速比例为 1:3, 以及时间比例为 3:100, 且假定的目标建筑是按日本规范所指定的郊区风场, 即日本荷载规范 AIJ(2004) 中的 III 类风场, 所以其平均风速剖面指数为 0.20, 梯度风高度为 450m, 10m 高度处的来流紊流强度为 25%, 在试验中此风洞 10cm 高度处的风速为 7.5m/s, 对应实际建筑的设计基本风速为 22m/s. 本文采用实际风洞试验体型为长 240mm, 宽 160mm, 以及高 40mm, 坡度为 45° 的四坡低矮建筑模型.

本文采用数值模拟方法, 通过建立实际尺寸为 24m × 16m × 4m 的计算模型, 且计算域取为 360m × 160m × 60m, 建筑模型位于流域沿流动方向上游 1/3 处, 计算模型的阻塞率小于 3%. 本文基于雷诺时均方程 N-S 方程和分别采用标准  $\kappa - \epsilon$  模型、Realizable  $\kappa - \epsilon$  模型、RNG  $\kappa - \epsilon$  模型, 模型附近网格分布密集, 远离模型的流域网格分布相对稀疏, 网格数控制在  $14 \times 10^6$  左右. 选取 0° 与 90° 风向对模型进行分析, 模型以及测点分布情况如图 1 所示, 选取模型中轴线以及典型测点数据进行对比.

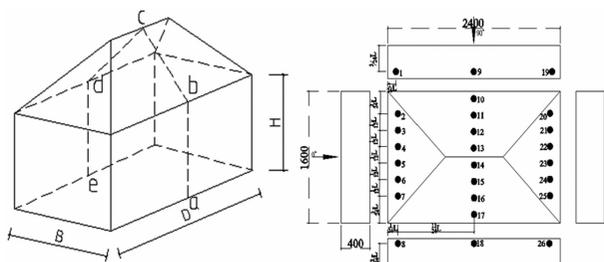


图 1 低矮房屋试验模型测点以及风向角示意图

Fig.1 Model and Wind direction and pressure tap distributions on the roof

由于日本东京大学风洞试验数据中已有相对应位置的有关平均风压系数的统计, 遂将模拟结果与试验数据的平均值进行对比, 同时为方便进行对比, 将计算结果换算成无量纲的平均风压系数  $C_p$  ( $C_p = \frac{p - p^0}{0.5\rho U^2}$ ), 其中  $p$  为表面压力, 为大气边界层外缘气流的压力, 为空气密度,  $U$  为参考高度风速.

对比情况如图 2、图 3. 此模型的建立通过采取不同湍流模型的计算结果与东京工业大学风洞试验数据进行对比.

由图可见, 通过对比显示采用 RNG 模型在 0° 与 90° 来流时数值模拟结果能够与风洞试验结果总体较好吻合, 这源于 RNG 模型是来自严格的统计技术, 相较于标准模型它在  $\epsilon$  方程中增加了一个条件, 从而有效地提高了精度. RNG 模型考虑了湍流漩涡, 提高了这方面的精度. RNG 理论为湍流 Prandtl 数提供了一个解析公式, 而标准模型使用的是用户提供的经验常数<sup>[10]</sup>. 这也表明 RNG  $\kappa - \epsilon$  模型能更好地处理这种流动, 本文所采用模型和参数对研究具有一定适用性.

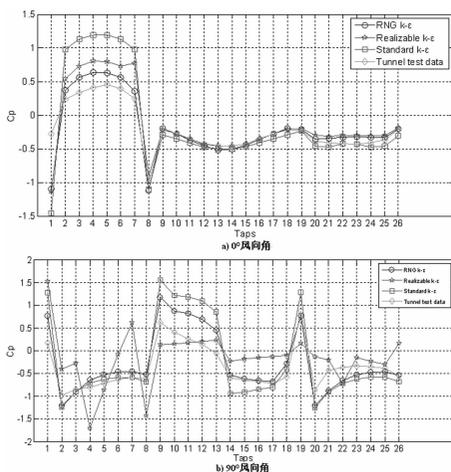


图 2 模型中测点平均风压系数对比

Fig. 2 Average wind pressure coefficients comparison along points of model

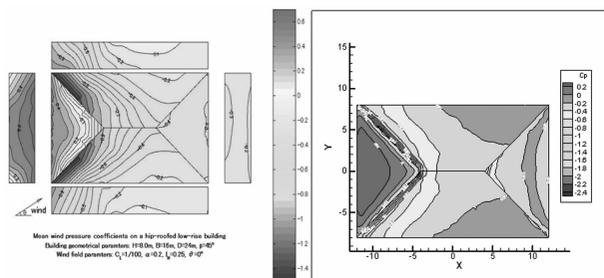


图 3 风洞试验平均风压系数与数值模拟平均风压系数

Fig. 3 Mean wind pressure coefficients of wind tunnel test and Numerical simulation

### 2 檐口构造对屋面风压影响研究

#### 2.1 檐口外长度对表面风压的影响研究

基于对屋面檐口长度对屋面风压影响的分析, 本文针对坡角为 45° 的低矮四坡房屋, 增加檐口,

且檐口高度与模型一致,根据国家关于挑檐规范02G08,挑檐外伸尺寸不低于600mm.本文模拟了挑檐外伸长度分别选取0.6m、1.0m、1.5m、2.0m,挑檐高度 $h$ 各为0.5m、1.0m、1.5m以及当风向角为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 以及 $90^\circ$ 风角进行分析,为了方便分析将屋面分为四个区域,如图4所示.

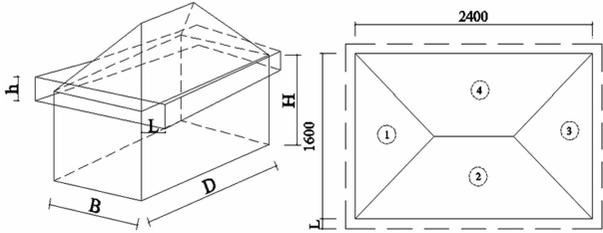


图4 带挑檐房屋模型及屋面分区

Fig. 4 Area division of roof

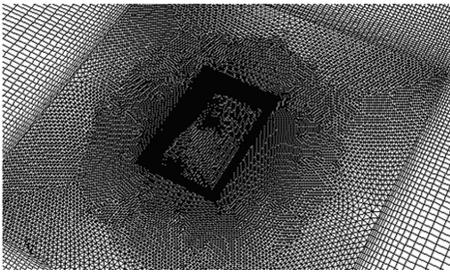


图5 模型网格划分

Fig. 5 Computation model grid partition

图6为三个不同檐口高度下,随檐口长度增加表面风压变化曲线,从图中可看出当檐口高度为0.5m时,迎风屋面1区平均风压系数随挑檐长度增加,负风压减小,迎风屋面1区最大负压出现在0.6m工况下,最大值为-0.08,外伸长度达到1.5m时,屋面受到正压,正压最大出现在外伸长度为2.0m时,为0.17.背风屋面3区在不同檐口长度平均风压系数均为负值,且与1区在图形中呈对称相反趋势,而侧风屋面2区和4区,受挑檐长度的影响较小,且受到较大的风吸力,两个区域当受到 $0^\circ$ 风向时两个屋面沿房屋中心线对称,所以两者平均风压系数非常接近.而在檐口高度在1.0m时,迎风屋面随挑檐长度增加,负风压整体趋势减小,其余三个面在挑檐长度为1.0m时,曲线大幅度上扬,三个区域平均风压系数的绝对值最小,从图7中可看出在垂直风的作用下,来流在模型迎风面挑檐处生成两个涡,在屋面上形成负压区域,风通过撞击挑檐以及迎风屋面发生分离,在背风面发生再附现象,以及在房屋模型背后形成环流,以致背风面受到撞击,受到正风

压,在其余长度下影响较小.当檐口高度在1.5m时,迎风屋面在外伸长度为0.6m时受到的负风压最小,为-0.13,迎风屋面外伸长度呈增大趋势,大小变化不大,在-0.22~-0.24之间,其余三个屋面面趋势与迎风屋面大致相同.

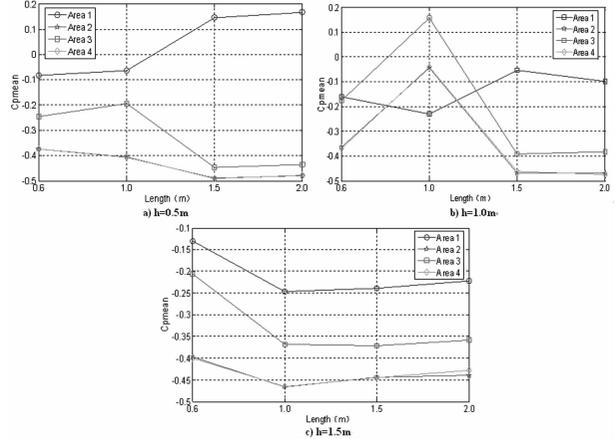


图6 相同出挑高度不同外伸长度的影响

Fig. 6 The influence of different length of overhanging relative height

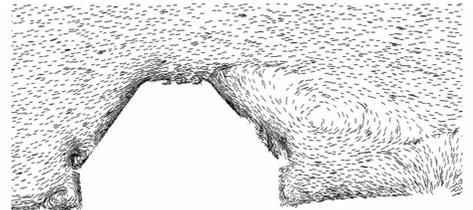


图7  $l=1.0\text{m}, h=1.0\text{m}$  房屋周围风场迹线图

Fig. 7  $l=1.0\text{m}, h=1.0\text{m}$  Trajectories of wind field around house

## 2.2 檐口竖向高度对表面风压的影响研究

基于对屋面檐口出挑高度对屋面风压影响的分析,模型与2.1相同,模拟了挑檐外伸长度各为0.6m、1.0m、1.5、2.0m,挑檐高度 $h$ 分别选取0.5m、1.0m、1.5m进行分析,屋面分区同样如同图4.

图8分别为在外伸长度为 $l=0.6\text{m}, 1.0\text{m}, 1.5\text{m}, 2.0\text{m}$ 时,随檐口高度增加表面风压变化曲线,从图中可看出,当外伸长度为0.6m时,迎风屋面1区平均风压系数均为负,且随挑檐高度增加,负风压增大,迎风屋面1区最大负压出现在出挑高度为1.0m时,最大值为-0.16,其他三个区域都随出挑高度增加呈现不同变化,侧风屋面因对称性两者变化趋势以及大小基本相同,背风屋面3区在不同檐口长度平均风压系数变化大,随檐口高度增长,负风压减小,与迎风屋面变化趋势相反,且在高度为1.0m时,三个区域平均风压系数的绝对值最小.当外伸长度为1.0m时,迎风屋面平均风压系数均为

负,且呈增大趋势,而在当挑檐高度到 1.0m 时,此时风通过撞击挑檐以及迎风屋面发生分离,在背风面发生再附现象,受到正风压.当外伸长度为 1.5m 与 2.0m 时,迎风屋面 1 区随挑檐高度增加,负压增大,其余三个区域因挑檐高度变化影响较小.

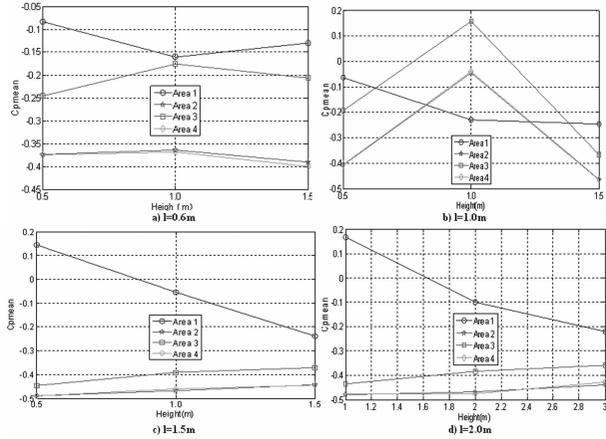


图 8 相同外伸长度不同出挑高度的影响

Fig. 8 The influence of different h overhanging relative eight of length

### 2.3 不同工况对表面风压的影响研究

为深入研究挑檐外伸长度与竖向高度以及风向角对房屋表面风压的影响,分别建立挑檐外伸长度 L 分别为 0.6m、1.0m、1.5m、2.0m,出挑高度 h 分别为 0.5m、1.0m、1.5m,共 12 个工况,如表 1 所示.

表 1 计算模型工况

Table 1 Parameters for different computational cases

Case Number	L/m	h/m	Case Number	L/m	h/m
1	1/40D	1/8H	7	1/16D	1/8H
2	1/40D	2/8H	8	1/16D	2/8H
3	1/40D	3/8H	9	1/16D	3/8H
4	1/24D	1/8H	10	1/12D	1/8H
5	1/24D	2/8H	11	1/12D	2/8H
6	1/24D	3/8H	12	1/12D	3/8H

风向角分别为 0°、10°、20°、30°、45°、90°, 图为不同风向角下屋面各区域平均风压系数变化情况,由于 1 区会由迎风屋面逐渐过渡到侧风屋面,而侧风屋面 4 区逐渐变为迎风屋面.

当风向角为 0°时如图 9 所示,不同檐口类型对屋面所分四个区域平均风压系数 Cp 的影响,从图中可看出 1 区即迎风屋面区域在不同工况下受到的影响最为明显,波动最为剧烈,在工况 7 和工况 10 处受到正压,可见当外伸长度达到 1.5m 以上时,挑檐外伸高度为 0.5m 已无法达到减弱阻挡来

流撞击能力的效果,且迎风区域在工况 8 即挑檐外伸长度为 1.5m 与挑檐高度为 1.0m 时其平均风压系数 Cp 的绝对值为最小.同时由于 2 区和 4 区皆为侧风面,所以两个区域平均风压系数 Cp 变化趋势以及大小基本相同.除迎风屋面外,其他三个区域在工况 5 时即挑檐外伸长度与挑檐高度为 1.0m 时出现平均风压系数的绝对值为最小.当风向角为 10°时,1 区在不同工况下变化明显,受到正压的工况增多,工况 2、4、5、7、10 时均受到正压,且迎风区域在工况 11 时平均风压系数的绝对值最小,其他三个屋面均为负压区,4 区的变化最小,基本呈直线状.当风向角 20°时,迎风区域正压增大,4 区背风面平均风压系数的绝对值整体减小,变化不大,迎风屋面在工况 8 时平均风压系数的绝对值最小,其他两个区域较前面风向角而言,变化幅度减小.当风向角为 30°时,各工况 1 区平均风压系数的绝对值进一步减小,工况 11 所受到的风压最小,4 区整体变化趋势不大.

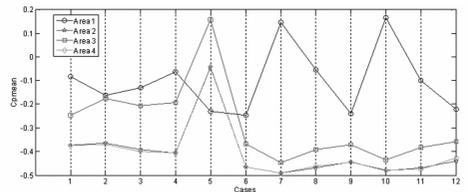


图 9 不同工况各区表面风压变化(0°)

Fig. 9 The surface wind pressure condition changes in different cases(0°)

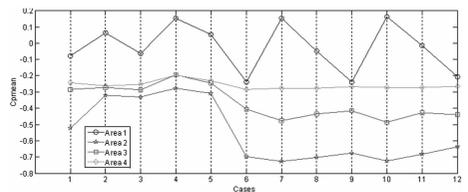


图 10 不同工况各区表面风压变化(10°)

Fig. 10 The surface wind pressure condition changes in different cases(10°)

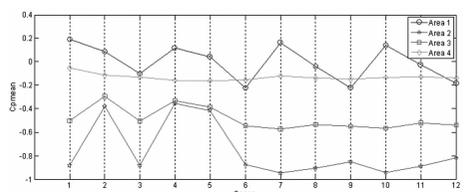


图 11 不同工况各区表面风压变化(20°)

Fig. 11 The surface wind pressure condition changes in different cases(20°)

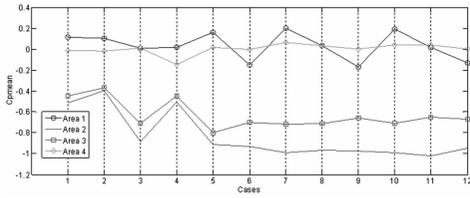


图 12 不同工况各区表面风压变化(30°)

Fig. 12 The surface wind pressure condition changes in different cases(30°)

如图 13 所示,在风向角为 45°时,可见风向角以及不同檐口类型对屋面所分四个区域平均风压系数  $C_p$  的影响,曲线变化不大,各区域风压受檐口构造变化影响较小,数值相差不大,同样从图中可看出 1 区与 4 区平均风压系数达到最大值,即迎风屋面区域受到的影响最为强烈,导致屋面风压增大,同样加剧了背风区域 2 区和 3 区所受负压,由此看 45°风向角为最不利风向角,且从图中可看出,在工况 11 时,1 区与 4 区的平均风压系数的绝对值达到最小,在 45°风向角来流时,效果最佳. 当风向角为 90°时,迎风屋面受到正风压,其余三个屋面均承受负压力,屋面受挑檐构造变化影响不明显. 且在工况 12 时,迎风区域所受正压力最小,从上各图可看出,当风向角为 45°与 90°时,迎风屋面所受风压远大于其他风向角,在工程设计与建设中应尽量避免此类风向角.

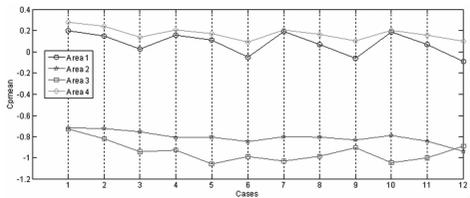


图 13 不同工况各区表面风压变化(45°)

Fig. 13 The surface wind pressure condition changes in different cases(45°)

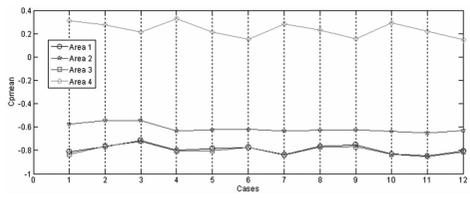


图 14 不同工况各区表面风压变化(90°)

Fig. 14 The surface wind pressure condition changes in different cases(90°)

由本文上述研究表明,在不同风向角下不同工况呈现出其抗风优势,0°风向角是为工况 8,10°风

向角时为工况 11,20°风向角时为工况 8,30°风向角时为工况 11,,45°风向角时为工况 11,90°风向角时为工况 12,因此选取此 6 种工况深入研究.

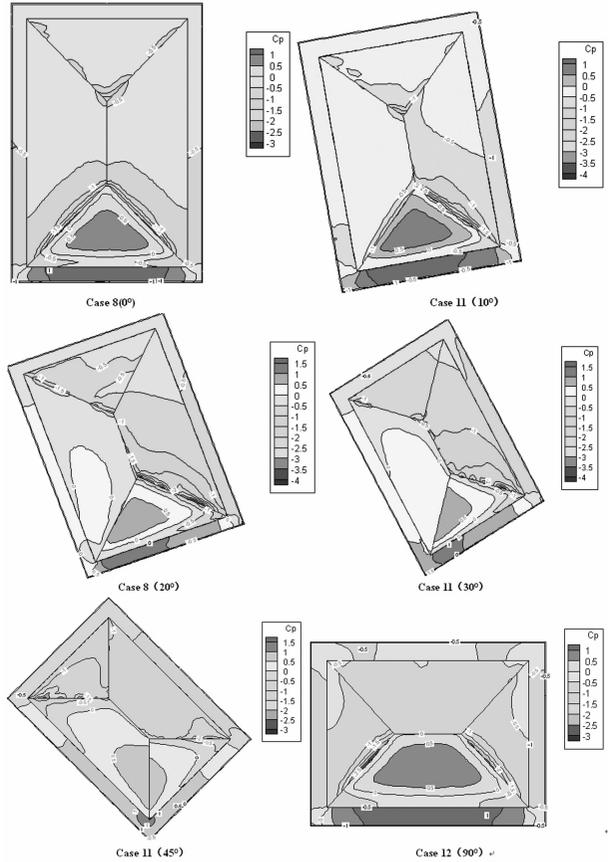


图 15 不同工况下屋面及挑檐风压系数等值线图

Fig. 15 Average pressure coefficient isoline of different model and coenice

从上面 6 个图中可以看出屋檐不同程度地干扰了来流运动,挑檐在不同风向角时挑檐所受风压均远大于屋面风压,背风屋面平均风压系数均为负值,且最大正风压均出现在迎风挑檐处,数值在 0.5 ~ 1.5 之间,而屋面最大负风压均出现在背风面屋脊处,负风压最大处平均风压系数  $C_p = -2.5$ ,迎风挑檐处以及背风面屋脊处两个部位是在今后的抗风设计中要考虑的问题,提高两处的风载体型系数,进行结构加固处理达到提高抗风能力,减小两处易损程度,同时可对降低房屋表面风压起到显著作用.

### 3 结论

本文采用数值模拟方法,对带挑檐低矮四坡房屋屋面平均风压进行了模拟,分别进行了分析. 通过对模拟结果的分析并总结,得到以下结论:

(1)低矮四坡建筑设置檐口对屋面的风压大小以及分布产生显著影响,檐口构造改变,各区域平均风压发生改变,能有效降低迎风区域风压,且呈现规律性变化,设置挑檐对屋面抗风较为有利。

(2)通过对不同工况的分析,在不同风向下,配置檐口外伸长度为 $1/16D$ 、 $1/12D$ ,竖向高度为 $2/8H$ 、 $3/8H$ ,能起到降低屋面平均风压的绝对值效果,且外伸长度为 $1/16D$ ,竖向高度为 $2/8H$ 为最有利抗风设计,可为低矮四坡建筑的抗风优化设计提供参考。

(3)带挑檐低矮四坡建筑屋面风压随风向角的改变而改变,当风向角为 $45^\circ$ 与 $90^\circ$ 时屋面所受风压最大,在工程应用中最为不利,在设计、施工中应尽量避免。

(4)当檐口外伸长度不变,随檐口竖向高度增加,迎风面风吸力随之增大,当檐口竖向高度不变, $h = 1/8H$ 、 $2/8H$ 时,随着檐口外伸长度的增加,迎风面负风压减小。

(5)迎风挑檐处与背风屋脊处为受到风压最大部位,今后设计应着重考虑增大两处风压承载能力。

## 参 考 文 献

- 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. 建筑结构学报, 2010, 31(4): 62~68 (Li Q S, Dai Y M, Li Z N. Wind pressure on low-rise building surface during a severe typhoon ‘Hagupit’. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(4): 62~68 (in Chinese))
- 陶玲,黄鹏,全涌. 屋脊和出山对低矮房屋屋面风荷载的影响. 工程力学, 2012, 29(4): 113~121 (Tao L, Huang P, Quan Y et al. Effect of ridge and protruding gable wall on wind loadings on low-rise buildings’ roof. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(4): 113~121 (in Chinese))
- 谢壮宇,刘帅,石碧青. 低矮房屋标准模型的风洞试验研究. 华南理工大学学报, 2011, 39(6): 107~112 (Xie Z N, Liu S, Shi B Q. Investigation into wind tunnel test of standard low-rise building model. *Journal of South China University of Technology*, 2011, 39(6): 107~112 (in Chinese))
- 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. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 205~211 (Gu M, Huang Q, Huang P et al. Numerical simulation of effects of roof factors on mean wind pressure on gable-roofed low-rise building with eaves. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(5): 205~211 (in Chinese))
- 宋芳芳,欧进萍. 低矮建筑风致内压数值模拟与分析. 建筑结构学报, 2010, 31(4): 69~77 (Song F F, Ou J P. Numerical simulation and analysis of wind-induced internal pressure on low-rise buildings. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(4): 69~77 (in Chinese))
- 陈水福,焦燊烽. 低层四坡屋面房屋表面风压的数值模拟. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(11): 1653~1657 (Chen S F, Jiao Y F. Numerical simulation of wind pressures on low-rise hip roofed buildings. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, 39(11): 1653~1657 (in Chinese))
- 黄敏谦,黄晶,高洪俊等. 四坡屋面低矮建筑风载体型系数研究. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(1): 164~168 (Huang M Q, Huang J, Gao H J et al. Study on wind load shape coefficient of low-rise buildings with hip roof. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2014, 12(1): 164~168 (in Chinese))
- 焦燊烽,于英霞,陈水福. 相邻低层四坡屋面房屋在风荷载下的相互干扰作用. 四川建筑科学研究, 2009, 35(6): 24~27 (Jiao Y F, Yu Y X, Chen S F. Interference effects on wind loads on two low-rise hip roof buildings. *Sichuan Building Science*, 2009, 35(6): 24~27 (in Chinese))
- GB 50009-2012, 建筑结构荷载规范. (GB 50009-2012, Load Code for the Design of Building Structures. (in Chinese))
- 李鹏飞,徐敏义,王飞飞. 精通CFD工程仿真与案例实战. 北京:人民邮电出版社, 2011, 124 (Li P F, Xu M Y, Wang F F. *Fluent gambit icem cfd tecplot*. Beijing: Posts & Telecom Press, 2011, 124 (in Chinese))
- Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, SEI/ASCE 7-05, 2005
- 谌胜,刘春川,李凤名. 基于CFD/CSD方法的亚音速平板结构气动弹性分析. 动力学与控制学报, 2013, 11(4): 363~368 (Shen S, Liu C C, Li F M. Aeroelastic analysis of plate structures in subsonic air flow based on CFD/CSD algorithm. *Journal of Dynamics and Control*, 2013, 11(4): 363~368 (in Chinese))
- Ralph T M, Silvero P. A new parametric equation for the wind pressure coefficient for low-rise buildings. *Energy*

and Buildings, 2013, 57(1): 245 ~ 249

14 孙颖昊, 周岱, 陈怡然等. 带檐口曲面双坡屋面风压数值模拟. 空间结构, 2013, 19(1): 41 ~ 49 (Sun Y H, Zhou

D, Chen Y R et al. Numerical simulation of wind pressure on concave gable roof with cornice. Spatial Structures, 2013, 19(1): 41 ~ 49 (in Chinese))

## NUMERICAL SIMULATION OF WIND PRESSURE DISTRIBUTION ON DIFFERENT CORNICE CONSTRUCTION OF LOW-RISE HIP ROOFED BUILDING \*

Dai Yimin Zou Simin<sup>†</sup>

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

**Abstract** Based on the data of wind tunnel test by Tokyo Polytechnic University, and validated RNG model hipped building surface pressure low reliability study. Study that cornice length and height of the influence on the low hipped roof surface wind pressure deeply. The results show that: The length and height of the cornice on the roof overhangs pressure affect apparently when cornice overhanging the same length, vertical height increases with cornice, windward wind suction increases, the vertical height unchanged when the cornice height of 0.5m or 1.0m, with overhanging eaves to increase the length of the windward side of the negative air pressure decreases, the cornice overhang length of 1.5m, 1.0m vertical height of the surface is most conducive to wind-resistant design, the conclusion can be shed some light on design of low-rise residential areas where typhoon occur frequently.

**Key words** computational fluid dynamics, hip roofed building, numerical simulation, cornice, wind pressure on roof

Received 8 July 2014, revised 20 October 2014.

\* The project supported by Department of Transportation Major Projects of Science and Technology(2011318824140), The Project of Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety (2013ZDK 06) and Education Department of Hunan Province(13K088)

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: zsm199024@163.com