

文章编号: 1000-5013(2008)02 0289- 05

带悬挑女儿墙双坡屋面风压的数值模拟分析

周显鹏, 彭兴黔, 张 松

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 考虑加设悬挑女儿墙对双坡屋面风压的影响, 将悬挑女儿墙设置高度与房屋檐高的比值作为控制参数, 利用计算流体力学软件 CFX 10.0, 以及 SST $k-\omega$ 模型和混合网格对一典型低矮双坡门刚厂房屋面平均风压进行数值模拟. 分析悬挑女儿墙对屋面风压的影响, 优化设计参数. 采用计算流体动力学数值模拟方法, 探讨常见的双坡屋面轻钢厂房模型在增设悬挑女儿墙后, 其屋面风压的变化及影响, 并与未增设悬挑女儿墙时的风洞实验结果对比. 结果表明, 增设悬挑女儿墙后能明显地降低屋面风荷载敏感区的负压峰值及风荷载体型系数.

关键词: 悬挑女儿墙; 屋面风压; 数值模拟; 风洞实验

中图分类号: TU 312⁺. 1 **文献标识码:** A

在我国沿海台风多发地区, 低矮房屋特别是门式刚架厂房的抗台风, 是一个现实而又亟待解决的问题. 目前有很多方法可以减小房屋屋檐处及角部漩涡引起的屋面平均风压和负压峰值^[1-3], 常见的构造措施有加设竖直女儿墙(多为实体型或透风型). 考虑到较高的竖直女儿墙会增加结构的弯矩, 对结构造成不利影响. 本文参照《CECS 102: 2002 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(以下简称《规程》)^[4] 对屋面的分区, 采用计算流体力学(CFD) 数值模拟方法, 探讨常见的双坡屋面轻钢厂房模型屋面各分区在增设悬挑女儿墙后其屋面风压的变化及影响.

1 风洞实验及带悬挑女儿墙房屋模型

1.1 风洞实验模型

测压模型为一门式刚架厂房, 长 60 m, 跨 24 m, 檐高 9 m, 双坡屋面, 坡度为 10°, 屋脊高 10.2 m, 屋檐及山墙四周未加设悬挑女儿墙. 模型几何缩尺比为 1: 100, 布置有 264 个测点, 屋面表面有 76 个测点, 为实验分区 A 区, 如图 1 所示. 实验在广东汕头大学风洞实验室进行, 风洞尺寸: 宽 3 m, 高 2 m, 长

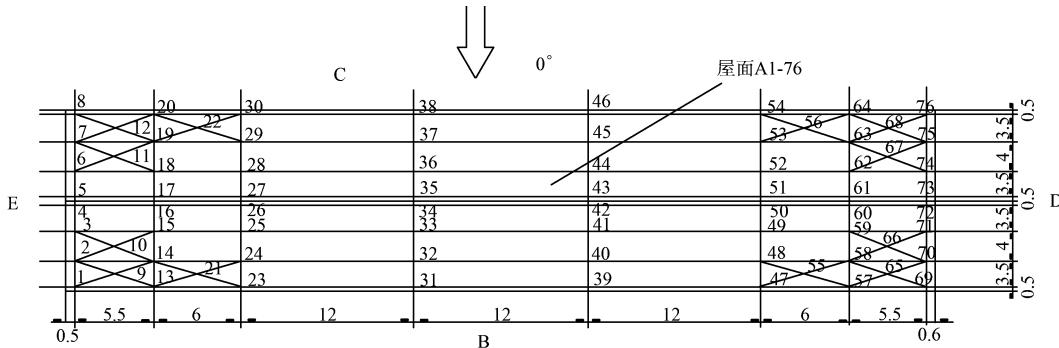


图 1 风洞实验屋面测压点布置图(单位: m)

Fig. 1 Layout of Measuring point in wind tunnel test(unit: m)

收稿日期: 2007-06 23

作者简介: 周显鹏(1982-), 男; 通讯作者: 彭兴黔(1959-), 男, 教授, 博士, 主要从事结构风工程的研究. E-mail: pxq@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省科技重大专项前期项目(2005YZ1016); 福建省自然科学基金计划资助项目(E0510022); 泉州市科技计划重点项目(2007G7); 厦门市发改委科技项目(2008 70)

度 20 m. 本次实验模拟参数(B 类地貌): 60 m 高度处来流风速为 $10.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 实验风向角有 13 个, 每 1 个 15° , 逆时针旋转, 从 $0\sim 180^\circ$ 对模型进行了测压, 实验数据采样频率为 312.5 Hz.

1.2 带悬挑女儿墙房屋数值模拟模型

计算模型在以上风洞实验模型的屋面四周, 加设 0.5 m 宽的悬挑女儿墙, 如图 2 所示. 沿屋脊方向未加设悬挑女儿墙. 为反映女儿墙离屋面高度 h 对屋面风压的影响, 当檐口高度 H 为 0, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40, 0.50, 0.65, 0.80 m 时, h/H 分别为 0, 0.011, 0.017, 0.022, 0.028, 0.033, 0.044, 0.056, 0.072, 0.089. 为了便于对屋面各个地方具体分析说明, 根据《规程》对维护结构风荷载体型系数分区的要求, 将门式刚架厂房屋面划分成若干区域, 屋面分区如图 3 所示. 图 3 中, A01~ A08 和 A09~ A16 分别为 0° 风向迎风屋面和背风屋面分区.

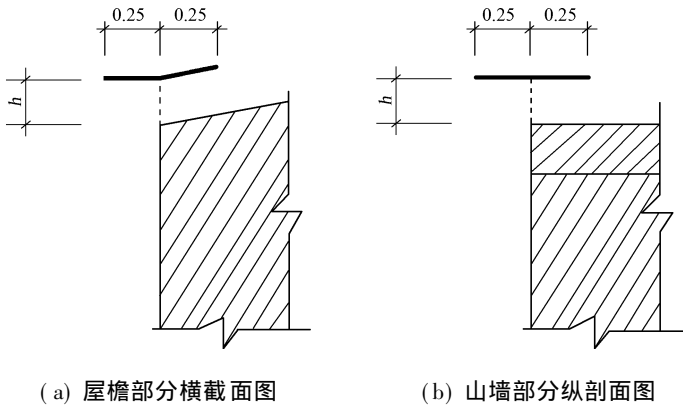


图 2 悬挑女儿墙剖面示意图(单位: m)

Fig. 2 Section plane of cantilevered parapet(unit: m)

图 3 中, A01~ A08 和 A09~ A16 分别为 0° 风向迎风屋面和背风屋面分区.

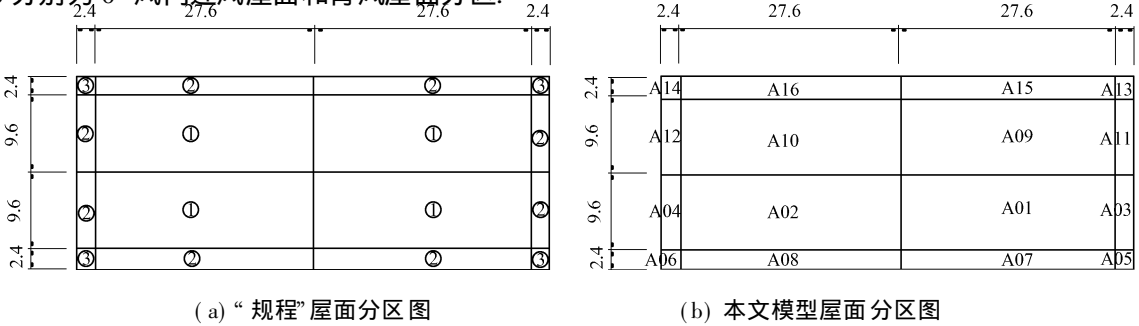


图 3 屋面 A 分区图(单位: m)

Fig. 3 Partition view of roof A(unit: m)

2 数值风洞模型

2.1 计算域及网格

考虑数值风洞大小的优化及其阻塞率不超过 $3\%^{[5]}$, 本文选取长 540 m, 宽 360 m, 高 50 m 的计算域, 以确保自由边界的成立. 房屋模型置于风洞底面, 距来流入口 $L_1 = 180\text{ m}$, 后方 $L_2 = 360\text{ m}$, 房屋屋脊处离顶面 39.8 m. 由于房屋尺寸较大, 既要模拟尺度较小的女儿墙以较好地划分好建筑物各角部的网格, 又要使得划分的网格质量高、数量少, 并且还要考虑到能够方便地模拟不同风向, 故本文将计算流域为 3 部分. 即包围建筑物的部分为内部流域, 长 80 m, 宽 44 m, 高 20 m; 中部圆柱体流域, 便于旋转, 其半径为 60 m, 高为 30 m; 外部流域即风沿自由边界尺寸, 如图 4 所示. 外部及内部两部分流域是采用六面体网格划分, 在建筑物表面周围及地面以上 1.5 m 内采用加密网格, 中部流域采用四面体网格划分. 各计算流域间采用能量守恒的 GGI(General Grid Interface) 连接. 外部流域最终得到 72 468 个六面体单元, 中间流域最终得到 402 184 个四面体单元, 内部流域依照不同女儿墙高度, 模型网格划分的单元数略有不同, 均在 4.5×10^5 个左右.

2.2 实验及数值模拟边界条件

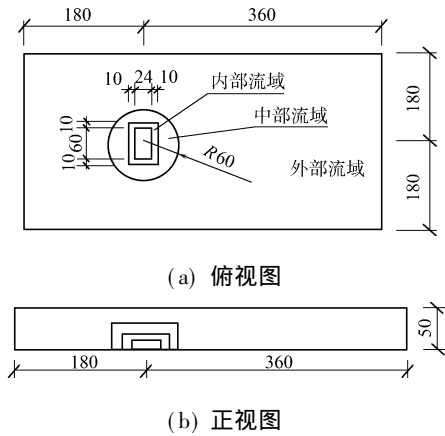


图 4 计算流域图(单位: m)

Fig. 4 2-D view of computational area(unit: m)

未加设女儿墙的房屋风洞实验是模拟 B 类地貌状态, 迎风面前方 60 m 高度处的风速为 $10.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 入口风剖面与文[6] 相同, $\bar{u}(z) = \bar{u}_b \cdot (z/z_b)^{0.06}$, 其中, $\bar{u}_b = 10.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $z = 60 \text{ m}$; 入口湍流剖面按湍动能 $k(z)$ 和耗散率 $\varepsilon(z)$ 的形式输入, 采用文[7] 的表达式, 即 $k(z) = 1.2 [I(z) \cdot \bar{u}(z)]^2$, $\varepsilon(z) = (C_\mu^{3/4} \cdot k(z)^{3/2}) / K L_u$. 其中, 系数 $C_\mu = 0.09$, $K = 0.4$, L_u 按模型尺寸取 58 m, 湍流强度 $I(z) = 20\%$, 采用二阶迎风插值格式. 数值风洞的底面采用非滑移壁面, 其他侧面采用自由滑移壁面, 出口采用开放式的压力出口.

3 数值模拟结果分析

3.1 模拟实验结果分析

取 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 风向角下的未加设女儿墙房屋模拟结果, 分别与实验结果(实验数据中 70, 72 两点是奇异点) 对比, 如图 5 所示. 从图 5 可看出, 数值模拟与实验结果相比, 相应测点的风压系数 C_p 在不同的

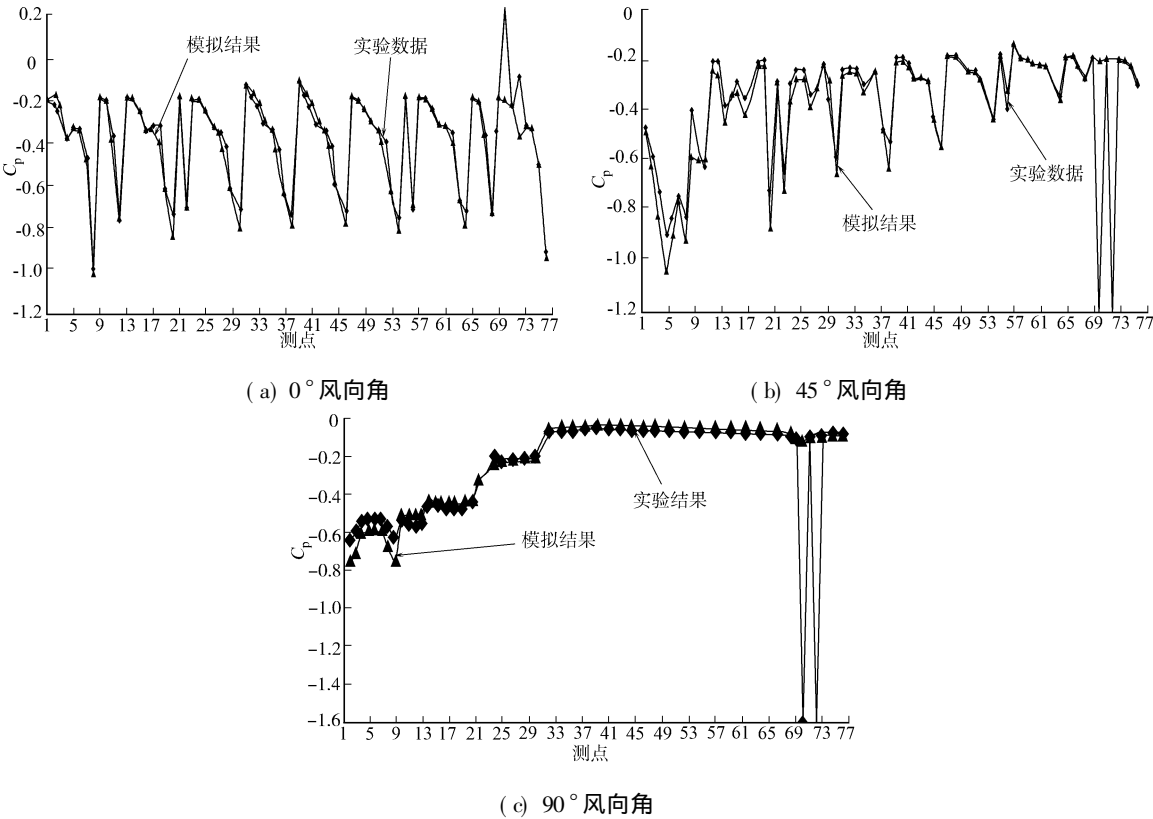


图 5 屋面各测点风压的数值模拟与实验结果对比

Fig. 5 The comparison between the results of wind tunnel test and numerical simulation

方向角下均基本吻合, 变化趋势一致, 多数测点数据误差较小. 特别关注各风向角下角部涡旋引起的风压峰值点. 0° 风向角下, 迎风面屋檐附近屋面测点中, $8^\#$ 测点误差为 2.5%, $20^\#$ 测点误差为 15.67%, $30^\#$ 测点误差为 11.07%, $38^\#$ 测点误差为 4.99%, 均为风压峰值绝对值偏大. 对称一侧测点误差基本相同, 背风面一侧屋面测点风压系数均较小. 在 45° 风向角下, $6^\#$ 测点误差为 14.65%, $7^\#$ 测点误差为 7.92%, $8^\#$ 测点误差为 45.11%, $12^\#$ 测点误差为 23.55%, $19^\#$ 测点误差为 13.89%, $20^\#$ 测点误差为 13.43%. 测点 $7^\#$ 为绝对值偏小, 其他均为绝对值偏大. 除上述分析屋檐分离处测点及峰值点外, 屋面其他测点数据绝对值较小, 误差百分比不大. 90° 风向角下, 在屋面迎风边缘处各测点误差均在 18% 以内, 多数在 15% 以内, 且绝对值均较小. 从图 5 及以上分析可以得出, 用计算模拟方法及边界条件设置, 能较好地模拟风洞实验结果, 屋面平均风压系数变化趋势一致, 误差不大, 在数值模拟与实验对比误差的普通可接受范围内. 其中, 这种误差变化与风洞实验自身无法克服的因缩尺寸带来的雷诺数变化, 而使得屋面上迎风边缘负压绝对值偏小相一致. 由此可认为, 模拟结果在此区域适度偏大是可以理解的.

3.2 加设不同高度悬挑女儿墙对屋面风压的影响

同样,取 0,45,90°风向角下,加设不同高度悬挑女儿墙屋面,各分区的风压系数平均值 $\overline{C_p}$ 对比分析,如图 6 所示.由于在 0°风向角下,屋面各分区相对于风速来流是对称的,且对称分区的 $\overline{C_p}$ 模拟结果

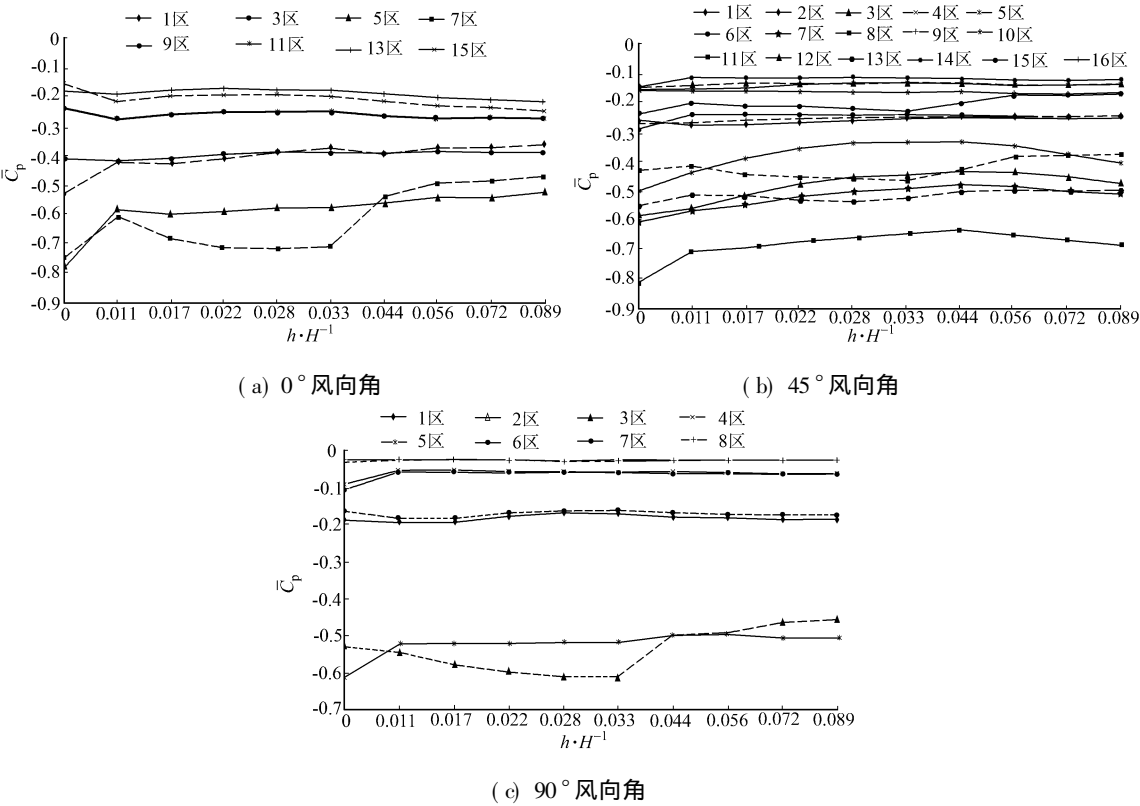


图 6 屋面各分区风压系数平均值 $\overline{C_p}$
Fig.6 $\overline{C_p}$ value of partitions on the roof

基本相等,故只取图 6 中所示的 8 个分区来进行分析.从图 6(a)中可以看出,在 0°风向角下,加设悬挑女儿墙能对迎风侧山墙处 3 区及背风侧 9 区、11 区、13 区、15 区(图 3)屋面 $\overline{C_p}$ 没有明显降低效果;对迎风侧屋面 1 区、5 区、7 区的屋面 $\overline{C_p}$ 有比较明显的降压效果.屋面各分区的 $\overline{C_p}$ 同 $h/H = 0$,即未加悬挑女儿墙时相比,当 $h/H = 0.011$ 时,1 区的 $\overline{C_p}$ 降低了 18.6%,迎风面屋檐处 7 区 $\overline{C_p}$ 减小 19.5%,5 区 $\overline{C_p}$ 降低 25.4%;当 $h/H = 0.033$ 时,1 区 $\overline{C_p}$ 最大降压 30.5%;当 $h/H > 0.011$ 时,5 区平均降低均达到 25%左右;当 $h/H > 0.44$ 时,7 区最低降压 28.5%,最高降压 36.8%.

同样,由图 6(b)可看出在 45°风向下,悬挑设女儿墙能有效地降低屋面迎风屋檐处 3 区、5 区、7 区、11 区的风压系数平均值 $\overline{C_p}$,对其他屋面区域风载影响不大.屋面各分区的 $\overline{C_p}$ 同 $h/H = 0$,即未加悬挑女儿墙时相比,当 $0.011 < h/H < 0.044$ 时效果明显;当 $h/H = 0.044$ 时,3 区降压 23.6%,5 区降压达 30.1%,7 区降压达 19.4%,11 区降压 20.7%;当 $h/H > 0.044$ 以后,图示 $\overline{C_p}$ 曲线下降,降压效果逐渐减弱,可以看出随着 h/H 的增大,其极限状态相当于无悬挑女儿墙状态,这与实际情况相吻合.即 h 增大到无限时,悬挑女儿墙对屋檐分流漩涡的抑制及破坏作用消失,对屋面风压不再有影响.

90°风向下屋面双坡对称,其分区的 $\overline{C_p}$ 模拟结果基本相等,故只取出一侧 8 个分区进行分析.由图 6(c)可看出,在 90°风向下,山墙为迎风面,模型为顺来流狭长状,此时加设悬挑女儿墙对屋面 1 区、7 区、2 区、8 区风压影响不大.同 $h/H = 0$ 相比, $h/H = 0.011$,4 区、6 区降压 40%,但平均风压绝对值不大,5 区降压 15.1%;当 $0.011 < h/H < 0.089$ 时,4 区、6 区及 5 区屋面风压基本没变化;当 $h/H < 0.033$ 时,山墙边缘分离区 3 区风压增加 15.5%;当 $h/H > 0.44$ 时,3 区 $\overline{C_p}$ 降低明显,最大降低 26.1%.

4 结论

本文参照《规程》对屋面的分区,探讨了常见的双坡屋面轻钢厂房模型屋面各分区在增设悬挑女儿墙后其屋面风压的变化及影响,得出如下 3 点结论

- (1) 悬挑女儿墙能够迫使其下方的高压气流平行于屋面, 其上方的低压气流在其后方形成的漩涡. 由于被下方的平行于屋面的气流所阻隔及破坏而不能影响到屋面, 降低了未加设悬挑女儿墙时漩涡引起的负压峰值. 通过模拟与风洞实验对比分析可知, 悬挑女儿墙可以有效降低屋面风荷载敏感区的负压峰值, 对屋面整体降压也有利, 表明加设悬挑女儿墙是一种有效地抗风导风措施.
- (2) 针对实验模型及本文模拟对象屋檐 9 m 高的双坡低矮房屋, 考虑四周设置限值: 宽 $b=0.50$ m, 高 $h=0.40$ m, 即 $h/H=0.044$ 的水平悬挑女儿墙, 是较优化的设计参数, 不同方向角下均能较大程度的减低屋面风压. 此限值可对此典型低矮房屋的抗风设计提供参考. 当然, 对于不同女儿墙宽度 b , 以及房屋的高宽比、宽跨比、坡度变化等因素对屋面风压的影响还有待后续工作分析, 所考虑的优化参数也会相应变化.
- (3) 相对于加强屋面结构强度以抗为主的防风灾措施, 增设水平悬挑女儿墙以降低屋面风压防风灾是一种采用气动措施以导风为手段达到抗风目的的优化措施. 前者耗材、浪费、造价高, 后者简单且效果明显. 另外, 女儿墙的设置还应考虑实际工程的其他功能要求, 如上人屋面的女儿墙, 既可达到削减屋面风压的目的, 也可起到围栏作用, 保护屋面上人的安全.

参考文献:

[1] 魏庆鼎. 透风性女儿墙对尖屋顶风荷载的影响[J]. 气动实验与测量控制, 1992, 6(1): 19-24.

[2] 傅继阳, 甘 泉. 开槽对大跨悬挑平屋盖结构风荷载的影响[J]. 实验力学, 2003, 18(4): 458-465.

[3] 张 松. 女儿墙对低矮房屋屋面风压影响的数值模拟[D]. 泉州: 华侨大学, 2005.

[4] 中国建筑金属结构协会建筑钢结构委员会. CECS 102: 2002 门式刚架轻型钢结构房屋钢结构技术规程[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 中国计划出版社, 2003.

[5] OLIVEIRA P J, YOUNIS B A. On the prediction of turbulent flows around full scale buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 86: 203-220.

[6] HOXEY P, RICHARDS R P, SHORT L J. Wind pressures on a 6cm cube[J]. Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89: 1553-1564.

[7] 周大伟. 高屋建筑风压风流场稳态与大涡模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.

Numerical Simulation of Wind Pressures on the Gable Roof with Cantilevered Parapets

ZHOU Xian-peng, PENG Xing-qian, ZHANG Song

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Considering the influence of wind pressure on the gable roof with cantilevered parapets, and taking the ratio of the height of cantilevered parapet to the height of eave as the control parameter, the average wind pressure on the gable roof of a typical low-rise portal steel frame is simulated numerically by the computational fluid dynamics software CFX 10.0, SST $k-\omega$ model and mixed grid, the influence of the cantilevered parapets on the wind pressure is analyzed, the design parameters are also optimized. When adding the cantilevered parapets, the changes and effects of the wind pressure on gable roof of the common light weight steel building, are discussed by numerical simulation, the calculation results are compared to the experimental wind tunnel results without parapets. The comparison shows that the cantilevered parapets can obviously reduce the peak values of negative pressure on the zones susceptible to wind pressure, and the shape factor of wind load.

Keywords: cantilevered parapet; wind pressure on roof; numerical simulation; wind tunnel test

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)