

文章编号:1674-2974(2016)07-0001-07

热带气旋中竖向风攻角对双坡低矮房屋 屋面风压的影响*

李秋胜^{1,2†}, 李建成¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 香港城市大学, 建筑学及土木工程系, 香港 999077)

摘要:基于热带风暴“彩虹”中采集的高分辨率风速风向和双坡低矮房屋屋面风压数据,研究了台风天气下来流垂直于屋脊线时竖向风攻角对双坡低矮房屋屋面风压的影响.结果表明:来流垂直屋脊线时,屋面特殊风压系数与来流竖向风攻角之间呈现明显的线性关系.测点特殊风压系数受来流竖向风攻角的影响程度随着测点距迎风前缘距离的增加而减小.另外,受屋脊的影响,双坡屋面背风面距离屋脊较近的区域受来流竖向风攻角的影响程度会有一定程度的增强.来流竖向风攻角可能是造成双坡屋面迎风前缘及背风面屋脊附近风压系数实验值与实测结果差异较大的主要原因之一,在进行风洞试验模拟时,应考虑来流竖向风攻角的影响.

关键词:竖向风攻角;低矮房屋;风压;热带气旋

中图分类号:TU973.32

文献标识码:A

Influences of Vertical Wind Angles on Roof Pressures of Low-rise Gable Roof Building during Tropical Cyclone

LI Qiu-sheng^{1, 2†}, LI Jian-cheng¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Dept of Architecture and Civil Engineering, City Univ of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Based on the high resolution data of the wind speed and direction, as well as the wind pressure data measured from an instrumental gable roof of a low rise building during the tropical storm of Mujigae, the influences of vertical wind angles on the roof pressures of the low-rise gable roof building are investigated when the incident flow is perpendicular to the ridge line during tropical cyclone. The results show a clearly linear relationship between the non-conventional pressure coefficients and incident vertical wind angles. As the distance between pressure taps and leading edge increases, the non-conventional pressure coefficients affected by the incident vertical wind angles decrease. In addition, due to the influence of the ridge, leeward roof area that is close to the ridge is greatly affected by the incident vertical wind angles. The incident vertical wind angle may be one of the main causes for the discrepancy between the experimental pressure coefficients and field measurements near the leading edge and the ridge. Therefore, the

* 收稿日期:2015-04-02

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90815030), Key Program of Major Research Project of National Natural Science Foundation of China(90815030); 国家自然科学基金资助项目(51178179), National Natural Science Foundation of China(51178179)

作者简介:李秋胜(1962-),男,湖南永州人,教授,中组部千人计划国家特聘专家,教育部长江学者

† 通讯联系人, E-mail: bcqsl@cityu.edu.cn

influences of the incident vertical wind angles should be considered in the wind tunnel tests.

Key words: vertical wind angle; low-rise buildings; wind pressure; tropical cyclone

台风风致灾害是最主要的自然灾害之一,我国地处西太平洋海岸,是世界上受台风影响最为严重的国家之一.灾后调查显示,风灾中损毁的绝大多数建筑为低矮房屋,其主要破坏形式为屋面外覆构件的局部损坏,如屋面角部、屋檐和屋脊附近区域.在我国东南沿海地区,双坡屋面低矮房屋是居民住房的主要建筑形式之一,开展该类型低矮房屋在台风作用下的实测研究具有重要意义.

近40年来,关于低矮房屋风致风压,国内外学者开展了大量的实测研究,其中比较著名的有英国的艾尔斯伯里实验房^[1]、西尔斯框架结构实验房(SSB)^[2-5]、美国德克萨斯理工大学实验房(TTU)^[6-8]以及国内的湖南大学台风实测房(I期平坡实测房和II期双坡实测房)^[9-11]和同济大学变坡实测房^[12].大量的实测结果与风洞试验结果对比显示,低矮房屋屋面迎风前缘、屋面角部区域以及双坡屋面屋脊附近风压实测值与风洞试验结果差异较大^[3,9,11],风洞试验低估了这些区域的峰值风压和脉动风压.目前,国内外学者认为在低速风洞中难以准确模拟雷诺数相似条件和近地面层风场特性是造成这种偏差的主要原因^[13-15].

风洞试验中模拟的风场一般不考虑竖向风攻角,但实际环境中,由于风自身结构或者周边地形的影响,风具有一定的竖向风攻角^[16].竖向风攻角的存在会加剧来流在屋面迎风前缘的分离效应,对屋面风压产生不利影响.但国内外关于竖向风攻角对屋面风压影响的研究很少,Letchford等^[17]设计了一个可以沿对角线纵向旋转的平坡低矮房屋试验模型,通过改变模型的旋转角度来模拟不同的来流竖向风攻角,以评估来流平均竖向风攻角对锥形涡作用范围内风压特性的影响程度,结果表明在使用准定常理论预测屋面角部风压时,引入竖向风攻角可以减小风洞试验结果与实测结果的误差.Wu等^[18]基于TTU的实测数据分析了竖向风攻角对屋面角部风压系数的影响,其研究表明竖向风攻角对锥形涡的形成和发展有非常大的影响,低矮房屋设计中不能忽视竖向风攻角的影响.

鉴于目前关于竖向风攻角对低矮房屋屋面风压影响的研究较少,且多是针对平坡屋面低矮房屋的研究,本文基于在热带风暴“彩虹”中采集的高分辨

率近地面风速风向数据和双坡低矮房屋屋面风压数据,分析了来流垂直于屋脊线这一工况下,竖向风攻角对双坡低矮房屋屋面风压的影响规律.本文研究结果可为改进现有风洞试验模拟技术提供参考.

1 监测系统及热带风暴“彩虹”介绍

1.1 监测系统介绍

本文数据来自湖南大学台风监测系统II期工程,该监测系统位于海南省文昌市锦山镇某临海位置,由一栋双坡屋面低矮房屋和一座10 m高气象监测塔组成,如图1所示.房屋尺寸为12.32 m×6.0 m×3.2 m(长×宽×高),屋面坡角为11.3°.四台二维机械式风速仪(RM Young 05106)分别安装在气象监测塔的3.2, 5.0, 7.5, 10.0 m高处;另外,一台超声风速仪(Gill Wind Master Pro)和一台三维机械式风速仪(Model 20075 Gill UVW)分别安装在10.0 m和3.2 m高度处.观测点周围地貌及仪器技术参数详见文献^[11].文中所用数据采样频率均为20 Hz.



图1 双坡实测房和气象塔
Fig. 1 The gable roof experimental building and the meteorological tower

1.2 热带风暴彩虹介绍

热带气旋彩虹(国际编号0913)于2009年9月9日在南海中部形成,之后向西北移动,横过南海北部,并于9月10日增强为热带风暴.9月11日凌晨,彩虹达到其最高强度,中心附近最高风速约为75 km/h,并横过海南岛北部,进入北部湾海域,9月12日早上彩虹在越南北部登陆,并减弱为热带低气压.热带风暴“彩虹”中心距实测房最近直线距离约为38 km,其路径如图2所示.

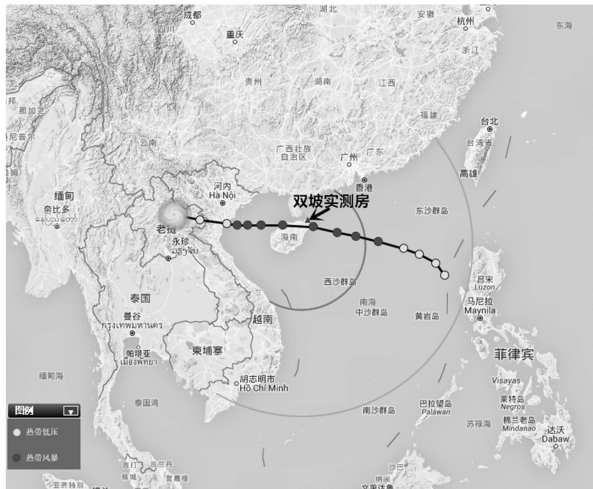


图2 实测房位置和热带风暴彩虹路径图
Fig.2 Location of the experimental building and track of tropical storm Mujigae
(资料来源:中国南海台风网)

实测系统同步采集了热带风暴彩虹影响实测地点时的风速风向和屋面风压数据. 本文设定风速阈值为 10 m/s , 即仅选择 10 min 平均风速大于 10 m/s 的风速数据以及对应的风向和风压数据. 经过筛选, 最终选择了时长为 4 h 的实测数据作为分析样本. 图 3(a)(b) 分别给出了 $3.2, 5.0, 7.5, 10.0 \text{ m}$ 高度处的 10 min 平均风速时程和平均风向时程. 由图可知, 4 个高度处之间风速和风向数据体现了很好的一致性, 说明了风速风向数据的可靠性. 图 3(c) 给出了 3.2 m 高度处的 3 s 平均竖向风攻角时程.

2 数据处理方法

2.1 数据质量控制

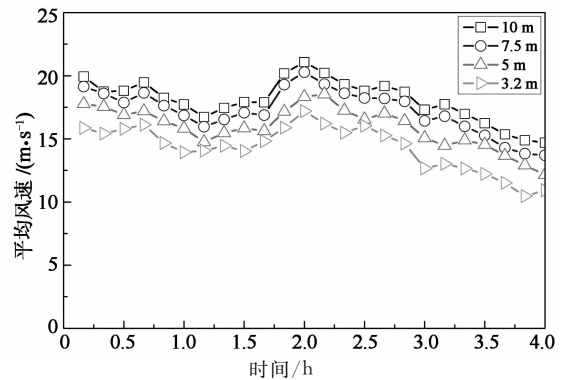
台风登陆过程中的实测风速常伴有非平稳过程, 对台风脉动特性进行分析时, 需经过平稳性检验, 否则会导致平稳随机序列统计样本参数出现误差. 选取 10 min 为参考时距, 即时长为 10 min 的数据为 1 个样本单元, 采用逆序法^[19] 分别对全部数据中的每个样本单元进行平稳性检验, 选取满足 95% 置信水平条件的平稳过程样本用于分析.

2.2 定义特殊风压系数

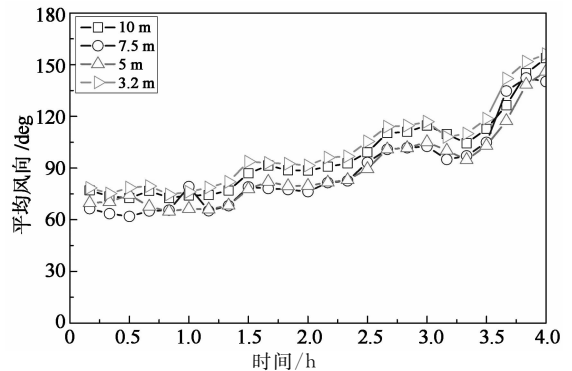
风工程中常用的风压系数(本文称为传统风压系数)为风压与参考高度处某一指定时距(通常为 10 min) 下的平均动风压的比值:

$$C_p = \bar{p} / \left(\frac{1}{2} \rho \bar{v}^2 \right). \quad (1)$$

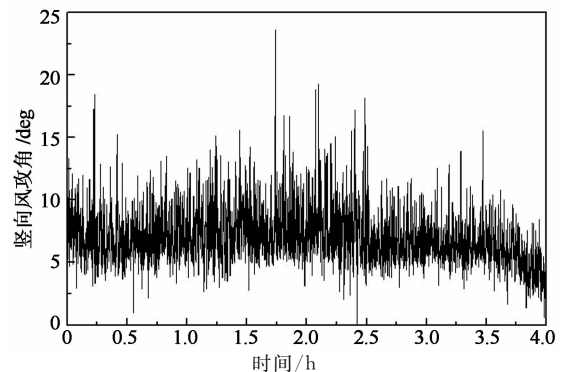
式中: C_p 为传统风压系数; \bar{p} 为平均风压; ρ 为空气密度; \bar{v} 为参考高度处的平均风速.



(a) 10 min 平均风速



(b) 10 min 平均风向



(c) 3 s 平均竖向风攻角

图3 10 min 平均风速、平均风向和 3 s 平均竖向风攻角时程

Fig.3 10 min mean wind speed, mean wind direction and 3 s mean vertical wind angle

由式(1)可知, 传统风压系数对风速的变化很敏感. 由于自然界中的风是变化无常的, 因此在计算平均风速时, 起始时间以及持续时距均会对平均风速的大小产生影响, 进而影响风压系数. 为了减弱风速对风压系数的影响, Zhao^[20] 以在测点正上方采集到的瞬时速度压为参考动压定义了一种瞬时风压系数. 这种瞬时风压系数能有效地减弱风速脉动对风压系数的影响, 更好地反映水平风向角和竖向风攻角对风压系数的影响规律.

本文实测系统中, 风速仪未安装在测点正上方, 而是安装在位于实验房北面, 距其 6.0 m 处的气象

塔上,故直接使用瞬时风压系数方法是不准确的.王云杰^[21]证明了当参考时距很短时,风速可认为是稳定的,故可以通过使用短时距内的平均速度压作为参考动压,以达到瞬时风压系数的效果.本文选用3 s作为参考时距,定义特殊风压系数:

$$C_p' = \overline{p(\tau)} / \left(\frac{1}{2} \rho v^2(\tau) \right). \quad (2)$$

式中: C_p' 为特殊风压系数; τ 为参考时距,本文取3 s; $\overline{p(\tau)}$ 为参考时距内的平均风压; $v(\tau)$ 为参考高度处(3.2 m, 屋面平均高度)的平均风速.

2.3 解耦竖向风攻角和水平风向角

虽然特殊风压系数已经减弱了风速脉动的影响,但其依然同时受到竖向风攻角和水平风向角的影响.因此,若想单独分析竖向风攻角对风压的影响,必须将竖向风攻角和水平风向角的影响进行解耦.将3 s平均水平风向角、平均竖向风攻角和各个测点处的特殊风压系数,按照水平风向角进行排序,可以得到某一水平风向角下特殊风压系数随竖向风攻角的变化规律;同理,若按竖向风攻角进行排序,可以得到某一竖向风攻角下特殊风压系数随水平风向角的变化规律.

3 结果分析

3.1 90°风向角下竖向风攻角对风压的影响

本文定义风平行屋脊线吹向实验房为0°风向角,按顺时针增加.选择关于中轴线对称的两列测点作为分析对象,如图4所示.

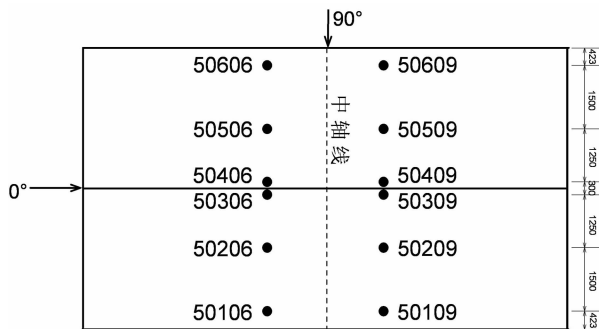
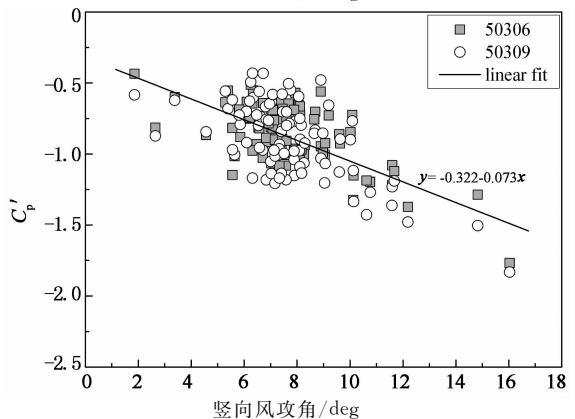
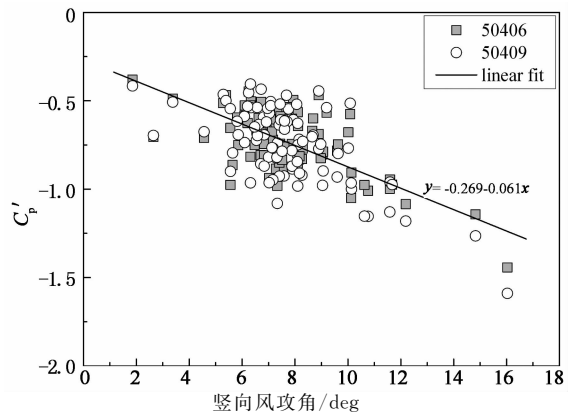
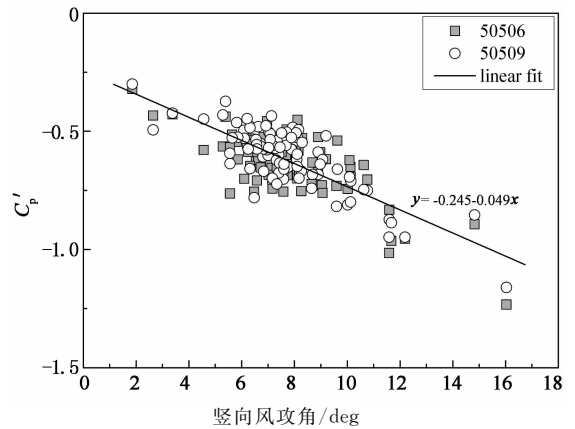
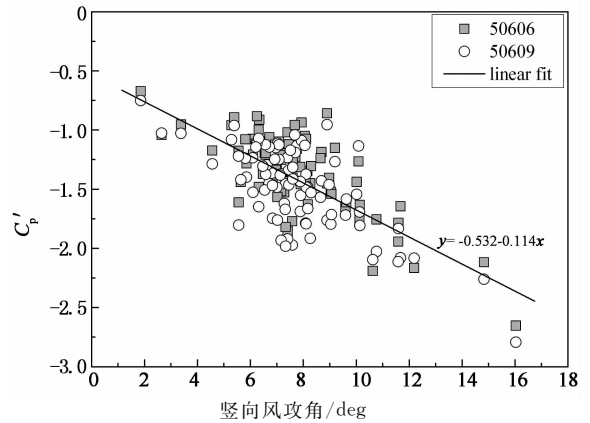


图4 水平风向角定义和测点位置

Fig. 4 The definition of horizontal wind direction and the location of particular pressure taps

图5给出了90°水平风向角下,各测点特殊风压系数随来流竖向风攻角的变化规律.由于房屋沿中轴线对称,若假设来流风在房屋尺度范围内沿水平方向完全相关,则理论上关于中轴线对称的一对测

点风压系数应该完全一致.由图5可知,关于中轴线对称的每一对测点的特殊风压系数均体现了很好的一致性,说明了本次实测风压数据的可靠性.



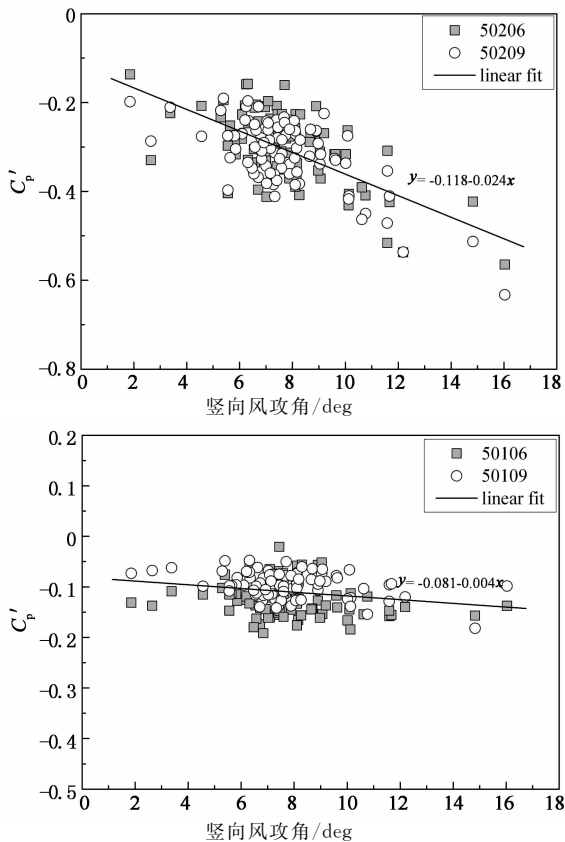


图 5 90°风向角下特殊风压系数随竖向风攻角变化
Fig. 5 The variation of non-conventional pressure coefficient with respect to vertical wind angle for 90° horizontal wind direction

由图 5 可以看出每一对测点的特殊风压系数与来流竖向风攻角之间均体现了明显的线性关系,为了评估不同位置测点风压受来流竖向风攻角的影响程度,对每对测点特殊风压系数与竖向风攻角之间的关系进行了线性拟合,并以拟合直线的斜率来表征测点风压受来流竖向风攻角的影响程度.拟合直线斜率绝对值越大表示该对测点风压受来流竖向风攻角的影响越强烈.

图 6 给出了拟合直线斜率与测点位置之间的关系.由图 6 可知,整体上拟合直线斜率绝对值随测点距迎风前缘距离的增加而减小,表明距离迎风前缘越远的屋面区域受来流竖向风攻角的影响越小,但屋面背风面距离屋脊最近的一对测点受来流竖向风攻角的影响程度突然增大,说明双坡屋面房屋屋面风压受屋脊的影响,屋面背风面距离屋脊较近的区域受来流竖向风攻角的影响程度会有一定程度的增强.另外,屋面迎风前缘位置测点风压系数受来流竖向风攻角影响程度远大于其余测点,说明迎风前缘位置是受来流竖向风攻角影响最强烈的区域.大量风洞试验结果与实测结果的对比显示,90°风向角

下,迎风前缘及背风面屋脊附近区域的风压系数实验值与实测结果差异较大^[3-4,11].由于风洞试验中未模拟竖向风攻角的影响,所以来流竖向风攻角可能是造成这种差异的原因之一.

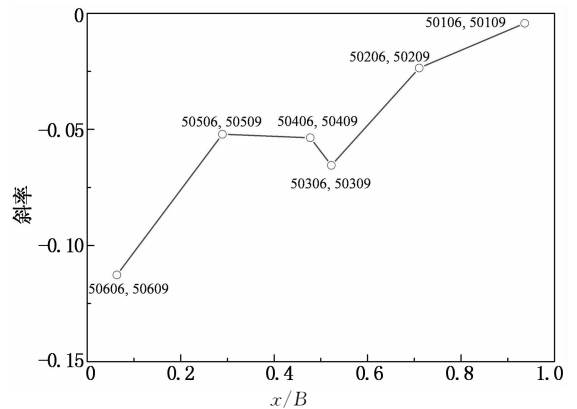


图 6 拟合直线斜率与测点位置的关系
Fig. 6 The relationship between fitting line slopes and locations of pressure taps

3.2 4°和 10°竖向风攻角下的特殊风压系数对比

为了进一步说明来流竖向风攻角对屋面风压的影响,图 7 给出了 4°和 10°两种竖向风攻角下每对测点实测特殊风压系数与水平风向角(80°~120°)之间的关系.之所以选择 4°和 10°竖向风攻角作为分析对象,是因为这两种攻角下各测点具有足够的数量,同时又能保证足够的攻角差,从而能更明显地体现竖向风攻角对屋面风压的影响程度.

另外,对受竖向风攻角影响较大的 4 对测点,图中给出了其风洞试验结果.试验是在湖南大学建筑与环境风洞实验室开展的(详见文献[22]),采样频率为 520 Hz,每个样本的采样时长为 115 s.模型缩尺比为 1:20,根据实测 3.2 m 高度处总平均风速和实验室内 16 cm 处的平均风速计算得到风速比为 1:2.15,根据斯托罗哈数相似可得时间比为 1:9.3,则实测 3 s 时长对应风洞中的 0.32 s 时长.对每个样本进行 0.32 s 滑动平均,之后计算 0.32 s 平均值的总体平均值和标准差,如图 7 所示.

10°竖向风攻角下,位于迎风前缘区域的测点 50606 和 50509 的特殊风压系数绝对值在 80°~120°风向角间均明显大于 4°竖向风攻角下的特殊风压系数绝对值,尤其是 90°和 120°风向角附近,这种差异更为明显,这主要是因为 90°风向角时,竖向风攻角的存在加剧了来流在迎风前缘处的分离;而 120°风向角下,竖向风攻角的存在影响了锥形涡的强度,这与 Wu^[18]在平坡屋面上得到的结果相似.测点 50506 和 50509 以及测点 50406 和 50409,在 10°

竖向风攻角下的特殊风压系数绝对值略大于 4° 攻角下的值. 屋面背风面靠近屋脊附近测点 50306 和 50309 的特殊风压系数在 90° 和 120° 水平风向角附近这种差异较为明显,而在其余风向角下,竖向风攻角的影响有限. 屋面背风面测点 50206 和 50209 以及测点 50106 和 50109 的特殊风压系数值在 2 种竖向风攻角下几乎没有差异,表明竖向风攻角对屋面背风面且远离屋脊的区域几乎没有影响,可以不予考虑.

另外,风洞试验结果与 4° 风攻角下的实测特殊风压系数之间的差异明显小于 10° 风攻角下二者之间的差异,说明竖向风攻角的增大加剧了实测与实验结果的差异.

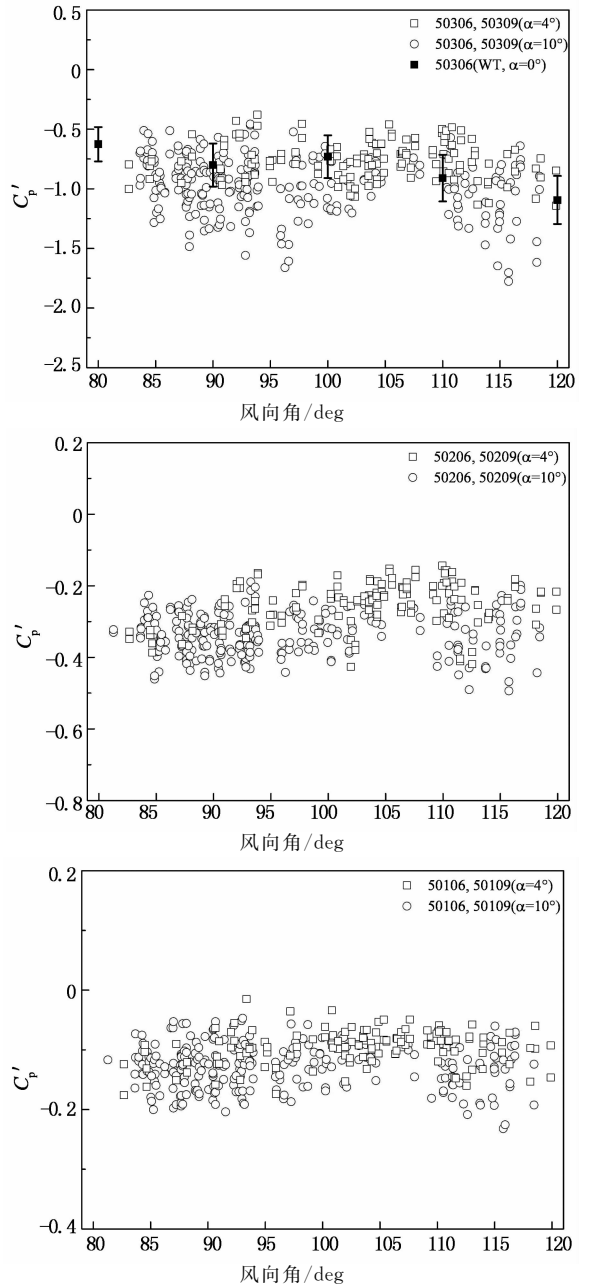
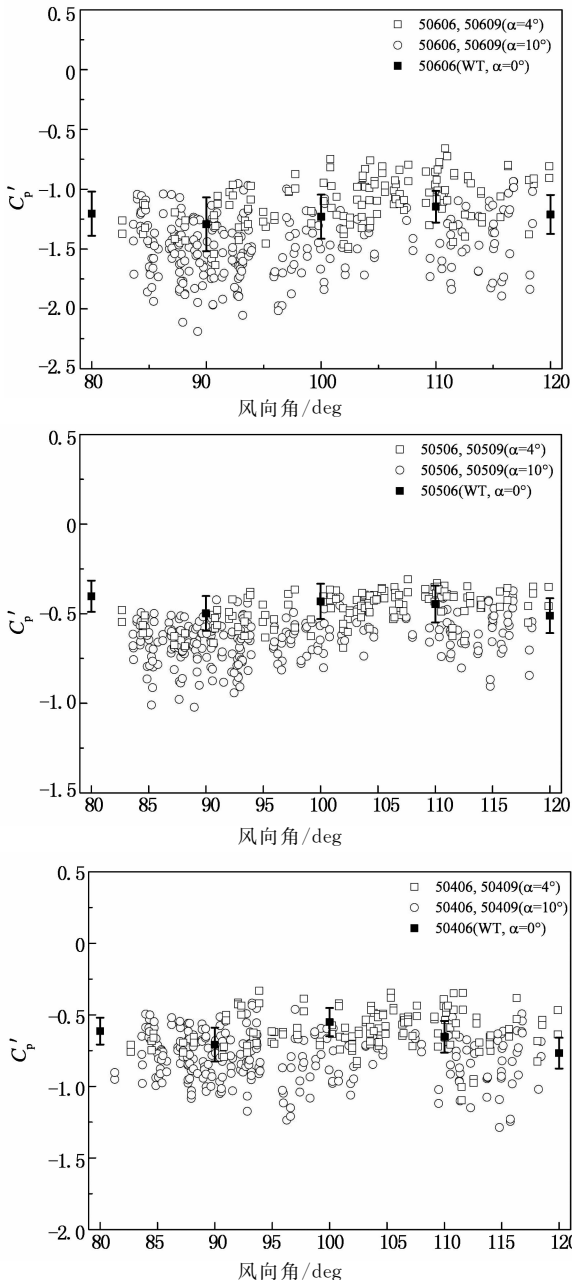


图 7 4° 和 10° 竖向风攻角下特殊风压系数对比
Fig. 7 The comparison of non-conventional pressure coefficients between 4° and 10° vertical wind angle

4 结论

本文基于在热带风暴“彩虹”中采集的高分辨率风速风向及低矮双坡房屋屋面风压数据,研究了台风天气中,来流垂直低矮双坡房屋屋脊线工况下竖向风攻角对屋面风压的影响规律. 得到如下结果:

- 1) 来流垂直于屋脊线时,屋面特殊风压系数与来流竖向风攻角之间呈现明显的线性关系.
- 2) 屋面迎风前缘处特殊风压系数受来流竖向风攻角的影响程度最强烈,随着测点距迎风前缘距离

的增加,测点特殊风压系数的受影响程度递减,在背风面且距屋脊较远的区域可忽略竖向风攻角的影响。但双坡屋面房屋屋面风压受屋脊的影响,屋面背风面距离屋脊较近的区域受来流竖向风攻角的影响程度会有一定程度的增强。

3)来流竖向风攻角可能是造成双坡屋面迎风前缘及背风面屋脊附近风压系数实验值与实测结果差异较大的原因之一。

参考文献

- [1] EATON K J, MAYNE J R. The measurement of wind pressures on two-storey houses at Aylesbury [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1975, 1: 67—109.
- [2] RICHARDSON G M, ROBERTSON A P, HOXEY R P, *et al.* Full-scale and model investigations of pressures on an industrial/agricultural building [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 36: 1053—1062.
- [3] RICHARDSON G M, SURRY D. The Silsoe structures building: comparison between full-scale and wind-tunnel data [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1994, 51(2): 157—176.
- [4] RICHARDSON G M, BLACKMORE P A. The Silsoe structures building: comparison of 1 : 100 model-scale data with full-scale data [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 57(2): 191—201.
- [5] RICHARDSON G M, HOXEY R P, ROBERTSON A P, *et al.* The Silsoe structures building: comparisons of pressures measured at full scale and in two wind tunnels [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 72(1): 187—197.
- [6] LEVITAN M L, MEHTA K C, VANN W P, *et al.* Field measurements of pressures on the Texas Tech building [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1991, 38(2): 227—234.
- [7] LEVITAN M L, MEHTA K C. Texas Tech field experiments for wind loads part I: building and pressure measuring system [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 43(1): 1565—1576.
- [8] LEVITAN M L, MEHTA K C. Texas Tech field experiments for wind loads part II: meteorological instrumentation and terrain parameters [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 43(1): 1577—1588.
- [9] LI Q S, HU S Y, DAI Y M, *et al.* Field measurements of extreme pressures on a flat roof of a low-rise building during typhoons [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 111(12): 14—29.
- [10] 李秋胜, 胡尚瑜, 戴益民, 等. 低矮房屋屋面实测峰值风压分析 [J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2010, 37(6): 11—16.
LI Qiu-sheng, HU Shang-yu, DAI Yi-min. Analysis of the field measured suction peak pressure coefficients on the flat roof of a low-rise building [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2010, 37(6): 11—16. (In Chinese)
- [11] 李秋胜, 胡尚瑜, 李正农. 低矮房屋风荷载实测研究 (II)——双坡屋面风压特征分析 [J]. *土木工程学报*, 2012, 45(4): 1—8.
LI Qiu-sheng, HU Shang-yu, LI Zheng-nong. Field measurements of wind loads on a low-rise building, Part II: wind pressure distribution characteristics on gable roof [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(4): 1—8. (In Chinese)
- [12] 王旭, 黄鹏, 顾明. 海边坡角可调试验房风荷载现场实测研究 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31(5): 176—182.
WANG Xu, HUANG Peng, GU Ming. Field investigation on wind loads of a low building with adjustable roof pitch near sea [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(5): 176—182. (In Chinese)
- [13] TIELEMAN H W, HAJJ M R, REINHOLD T A. Wind tunnel simulation requirements to assess wind loads on low-rise buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74/76: 675—685.
- [14] TIELEMAN H W. Wind tunnel simulation of wind loading on low-rise structures: a review [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(12): 1627—1649.
- [15] HOXEY R P, REYNOLDS A M, RICHARDSON G M, *et al.* Observations of Reynolds number sensitivity in the separated flow region on a bluff body [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 73(3): 231—249.
- [16] 肖仪清, 李利孝, 宋丽莉, 等. 基于近海海面观测的台风黑格比风特性研究 [J]. *空气动力学学报*, 2012, 30(3): 380—387.
XIAO Yi-qing, LI Li-xiao, SONG Li-li, *et al.* The investigations of the wind characteristics based on the Typhoon Hagupit observed offshore [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2012, 30(3): 380—387. (In Chinese)
- [17] LETCHFORD C W, MARWOOD R. On the influence of v and w component turbulence on roof pressures beneath conical vortices [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 69/71: 567—577.
- [18] WU F Q, 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.
- [19] BENDAT J S, PIERSOL A G. *Random data: analysis and measurement procedures* [M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000: 594.
- [20] ZHAO Z. Wind flow characteristics and their effects on low-rise buildings [D]. Lubbock: Texas Tech University, 1997: 71.
- [21] 王云杰. 平屋盖低矮房屋风荷载特性实测与实验研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2014: 43.
WANG Yun-jie. Wind pressure characteristics study of a flat low-rise building by field measurement and wind tunnel testing [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2014: 43. (In Chinese)
- [22] 胡尚瑜. 台风作用下低矮房屋风荷载现场实测和风洞试验及理论分析研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2012: 96—100.
HU Shang-yu. Field measurement, wind tunnel testing and theoretical analysis of typhoons-induced wind loads on low-rise buildings [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2012: 96—100. (In Chinese)