

典型双坡屋面风压分布特性风洞试验研究

赵雅丽, 全涌, 黄鹏, 顾明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 通过表面压力测量风洞试验对低矮建筑的 4 种典型双坡屋面上的风压分布规律进行了研究. 讨论了屋面和挑檐部分的平均和脉动风压系数在不同风向角下的分布特性, 风场湍流强度对屋面脉动风压分布的影响, 以及不同挑檐类型对双坡屋面风压空间分布的影响. 试验结果表明: 在屋脊及屋面边缘附近的平均风压系数绝对值要比屋面内部区域大; 脉动风压系数随湍流强度增大而增大, 一般在迎风屋檐附近比较大; 挑檐形式的改变仅对局部风压系数的影响较大, 对整体风压系数的影响较小. 这些结论为低矮建筑风荷载规范条文的修改提供了参考.

关键词: 低矮房屋; 双坡屋面; 风洞试验; 风压分布

中图分类号: TU 312.1

文献标识码: A

Wind Tunnel Test Study on Wind Pressure on Typical Gable Roofs of Low-rise Buildings

ZHAO Yali, QUAN Yong, HUANG Peng, GU Ming

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The wind pressure distribution on four types of typical gable roofs of low-rise building models are studied with pressure measurement wind tunnel tests. Three aspects are respectively discussed: the distribution characteristics of mean and fluctuating wind pressure coefficient on four types of gable roofs and eaves at different wind angles, the influence of turbulence intensity on the fluctuating wind pressure distribution and the influence of different roof types on the wind pressure spatial distribution. A detailed analysis of the experimental results show that absolute values of mean wind pressure coefficients are larger at roof ridge and near the edge of roof than on internal areas of roof. Fluctuating wind pressure coefficients increase with the turbulence intensities, which are larger on upwind roof than those on leeward roof.

Generally, there are larger fluctuating wind pressure coefficients near the windward eaves. The changes of eave shapes only have more obvious influences on local wind pressure coefficients than those on overall wind pressure coefficients. These conclusions provide reference for modifying clauses about wind loads on low-rise buildings.

Key words: low-rise buildings; gable roof; wind tunnel experiment; wind pressure distribution

我国东南沿海, 台风发生频繁, 且近年来台风造成的损失有逐年增多的趋势^[1]. 台风造成的建筑物结构破坏主要发生在低矮建筑物上, 特别是没有经过工程设计并且缺乏维护的居住建筑^[2]. 近年来, 针对我国东南沿海地区的多次风灾调查^[3-4]也显示, 无论是城市还是村镇, 低矮建筑破坏造成的损失超过风灾总损失的半数, 而低矮建筑破坏最多的是围护结构及屋面体系的破坏. 尽管风灾给低矮建筑带来的损失惊人, 但是目前对低矮建筑的风荷载特性及其破坏特征认识相对不足. 从 20 世纪 60 年代开始, 国外对低矮房屋风荷载开始了大规模的研究, 至 90 年代更是达到了顶峰. Stathopoulos^[5]对建筑表面压力受几何参数的影响进行了详细的研究并引导了北美规范的发展; Holmes^[6-7]的研究为澳洲的风荷载规范提供了数据; Uematsu 等^[8]的研究改进了日本规范的风荷载数据. 我国在这方面的研究工作相对滞后, 在规范的制定上也比较粗略, 并且中国传统的民居在外形及细部构造上独具风格, 因此, 不能完全照搬国外的规范来设计中国的民居.

本课题组对我国典型乡村低矮房屋的风荷载进行了模型测压试验研究. 根据我国低矮房屋特

收稿日期: 2009-07-07

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体基金资助项目(50321803); 国家自然科学基金资助项目(50708082, 50778108); “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ06B05, 2008BAJ08B14)

作者简介: 赵雅丽(1978—), 女, 博士生, 主要研究方向为低矮房屋抗风研究. E-mail: yalizhao@gmail.com

顾明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构抗风. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

点,研究各种屋面形式、房屋细部特征和不同风环境对低矮房屋风荷载的影响.第一阶段的试验主要是单体建筑物的风洞试验研究,房屋模型主要有 4 个系列:其一是平屋面系列,主要包括长方体、出檐平屋面、带女儿墙平屋面和盪顶屋面;其二是双坡屋面系列,主要包括三角形挑檐双坡屋面、硬山挑檐屋面、悬山挑檐屋面、不对称双坡屋面、卷棚屋面以及带老虎窗的双坡屋面;其三是带山墙的双坡屋面系列,原型主要参考典型的江南建筑风格,主要有马头型山墙、三角型山墙和圆弧型山墙;其四是四坡屋面系列,主要有四坡屋面、庑殿顶和歇山屋顶;此外还研究了一种客家土楼的环形建筑模型.第二阶段是研究低矮房屋的屋面坡度、长宽比、高宽比等参数的变化对房屋表面风压分布的影响,并且建立低矮房屋的气动数据库.第三阶段是针对低矮房屋的群体干扰的研究.

本文主要对双坡屋面系列中的三角形挑檐双坡屋面、硬山挑檐屋面、悬山挑檐屋面、不对称双坡屋面等风压分布进行细致研究,为抗风设计提供一定的依据.

1 风洞试验概况

本课题的刚性模型表面测压风洞试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室风洞试验室的 TJ-2 大气边界层风洞中完成.风洞的试验段尺寸为宽 3 m、高 2.5 m、长 15 m.空风洞试验风速范围为 $0.5 \sim 68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.模型试验的长度、风速和时间的缩尺比分别取为 $1:30$, $4:9$ 和 $3:40$.

1.1 大气边界层风场的模拟

我国的低矮房屋大都分布在中小城市、城市郊区和农村,在大中城市中心比较少见.因此,本课题选择 B 类和 C 类地貌(地面粗糙度)作为试验风场(GB 50009—2001)^[9].风场模拟采用在试验段的上游安置尖塔和粗糙元来实现. B 类和 C 类模拟风场的平均风速剖面指数分别为 0.16 和 0.22.中国规范没有针对大气湍流强度以及湍流积分尺度的规定,本次试验参考日本规范^[10]并结合中国实际, B 类和 C 类风场在 10 m 处的湍流强度分别为 0.19 和 0.22.图 1 给出了 B 类风场的风洞布置情况,平均风速及湍流强度剖面.图中, z 为离地高度, $V(z)$ 为高度 z 处的平均风速; V_g 为梯度风速; $I(z)$ 为高度 z 处的湍流强度.

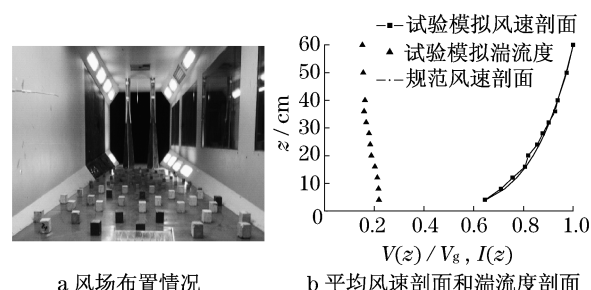


图 1 风洞中模拟的 B 类风场

Fig.1 Simulated wind field for terrain category of B

试验时 B 类风场与 C 类风场 33 cm(对应于实际高度 10 m)高度的试验风速分别为 $12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $11.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,对应于实际高度 10 m 处设计风速为 $28.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $26.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

1.2 试验模型

中国南方地区分布最普遍的是 2 到 3 层双坡屋面的房屋.将一个三角挑檐的双坡屋面建筑作为标准模型,并将其与其他双坡系列的硬山挑檐、悬山挑檐和不对称双坡屋面等的试验数据进行对照和比较.原型建筑的屋面坡度为 30° ,长、宽和高分别为 10.5, 7 和 7 m.模型尺寸以及屋面的测点布置如图 2 所示.标准双坡屋面模型作为后续试验的基准模型,在部分屋面上测点布置比较密集,左右侧山墙和前后墙面也布置了少量测点.由于测点总数的限制,在屋面上采取了满布不对称的测点布置,最密的地方测点间距为 1 cm,总测点数为 236 个.

在 B 类风场下,试验风向角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间以 10° 为增量逐渐增加,中间增加角度 45° ;在 $90^\circ \sim 360^\circ$ 之间以 15° 为增量变化,共 28 个角度.在 C 类风场下,风向角在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间均以 15° 为增量,共 24 个角度.

本试验中,测压信号采样频率为 120 Hz,每个测点采样时间为 90 s,对应实际采样频率为 9 Hz,实际采样时长为 20 min.

1.3 试验数据处理

建筑表面的风压用量纲一压力系数表示为

$$\bar{C}_{pi} = \frac{\bar{P}_i(t)}{0.5\rho U_H^2} \quad (1)$$

$$\dot{C}_{pi} = \frac{\sigma_{P_i(t)}}{0.5\rho U_H^2} \quad (2)$$

式中: \bar{C}_{pi} 为建筑物表面某测点的平均风压系数; $\bar{P}_i(t)$ 为测点的平均风压值; \dot{C}_{pi} 为测点的均方根风压系数; $\sigma_{P_i(t)}$ 为测点风压的标准差; ρ 为空气密度;

U_H 为建筑屋面平均高度处的来流风速.

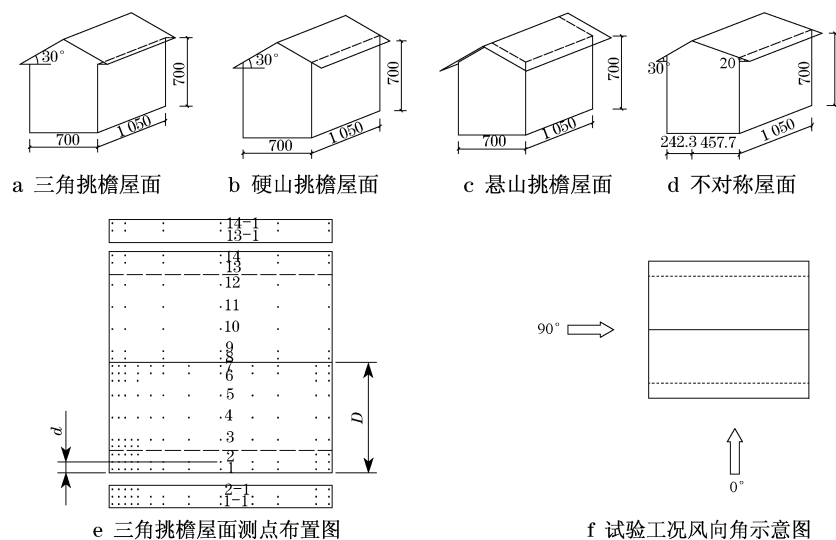


图 2 模型尺寸与屋面测点分布图(单位:mm)

Fig.2 Model configurations and locations of pressure taps(unit:mm)

2 试验结果分析

下面主要分析 4 种双坡屋面在不同风向角下的平均风压系数和脉动风压系数的空间分布特性,风场湍流强度以及屋面类型对于屋面风荷载的影响.

2.1 平均风压系数分布

图 3 是三角挑檐双坡屋面在 B 类风场 0° , 45° 和 90° 风向角下平均风压系数分布图. 为了方便描述,将 0° 风向角时的迎风屋面和背风屋面在其他风向角时仍然称为迎风屋面和背风屋面. 从图中可以看出,

风向角为 0° 时,除最边缘少数区域外,迎风屋面的平均风压系数主要呈现为正值,而背风屋面都是负值. 45° 斜风作用时,迎风屋面除了迎风屋角附近及屋面中部区域为正压以外,屋檐边缘、屋脊附近的大部分区域以及整个背风屋面均为负压,且背风屋面负压值比风向角为 0° 时的负压值更大、更不均匀; 90° 风向角时,风向与屋脊线平行,整个屋面全部呈现为负压,两片屋面上风压系数的分布对称,而且迎风边缘屋角处负压最大,沿着屋脊线的方向逐渐递减. 风向角从 0° 逐渐变化到 90° 时,屋面的负压的绝对值不断增大,正压值不断减小甚至消失.

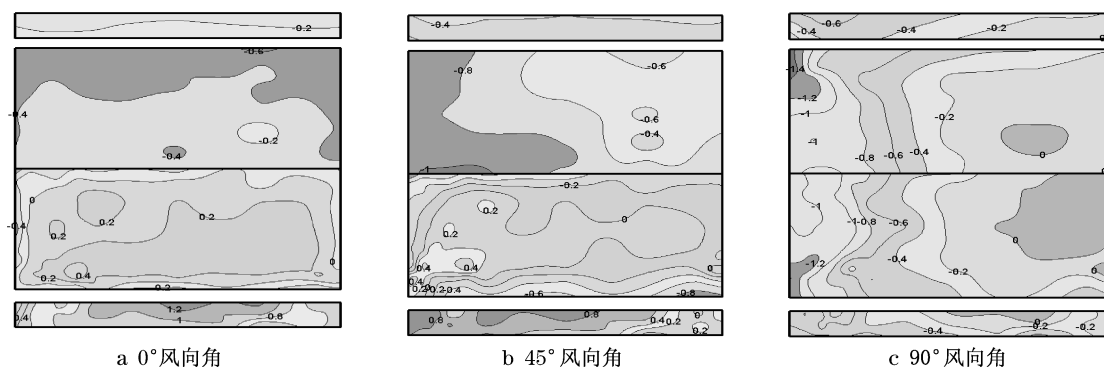


图 3 三角挑檐双坡屋面 B 类风场平均风压分布

Fig.3 Mean pressure coefficients on the trigonal-eaved gable roof in wind field of Type B

在 0° 风向角下迎风挑檐中部下表面的平均风压系数为 1.2 左右,由中部向边缘方向平均风压系数逐渐减小,在最边缘处减小到 0.2~0.3. 此时,背风挑檐下表面平均风压系数均在 -0.2 左右. 45° 风向

角下,迎风屋檐下表面的平均风压系数从迎风一侧的 +0.8 逐渐减小到另一侧的 -0.2 左右,背风屋檐下表面平均风压系数则在 -0.4 左右. 90° 风向角下,屋檐的下表面平均风压系数在 -0.6~-0.2. 当风

向角由 0° 逐渐变化到 90° 时,迎风挑檐下表面的平均风压系数由正压向负压转变,背风挑檐下表面的平均风压分布一直是负压,且负压的绝对值不断增加。

双坡屋面系列除三角挑檐外,还包括硬山挑檐、悬山挑檐和不对称双坡屋面,这 3 种屋面在 B 类风场下 45° 风向角时的平均风压系数分布特性如图 4 所示。

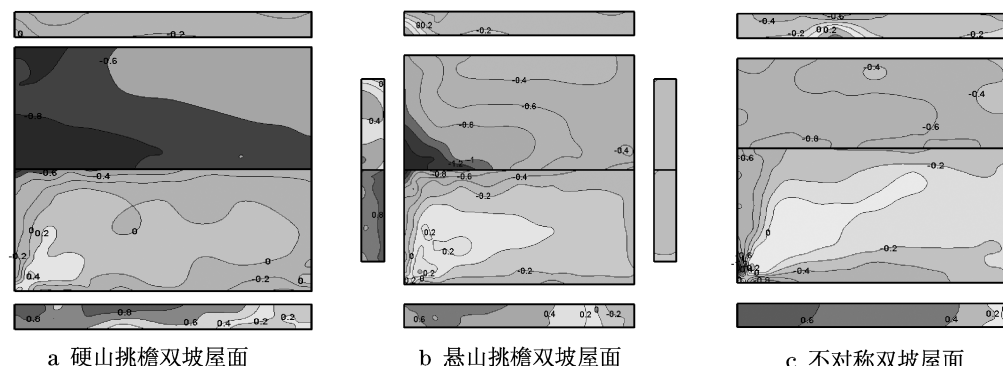


图 4 硬山挑檐、悬山挑檐及不对称双坡屋面 B 类风场 45° 风向角下的平均风压分布图

Fig.4 Mean pressure coefficients on other three kinds of gable roof at wind direction of 45° in wind field of Type B

硬山挑檐屋面的等压线图和三角挑檐屋面上的比较类似,在迎风屋面的山墙和挑檐连接的角部处平均风压系数出现比较大的梯度变化,从 $+0.4$ 迅速递减到 -0.2 . 在屋面边缘和屋脊附近出现绝对值较大的负压,三角挑檐屋面在屋面边缘平均风压(负压)系数出现最小值,达到 -0.8 . 硬山挑檐屋面的最小平均负压系数则为 -0.6 ,出现在屋脊边缘. 背风屋面的平均风压分布则较为缓和,三角挑檐屋面上平均风压系数大部分在 $-0.8 \sim -0.2$,硬山挑檐屋面上则在 $-0.8 \sim -0.6$.

悬山挑檐屋面在迎风屋面的挑檐山墙角部、山墙与屋面的连接边缘以及屋脊山墙的角部均产生了比较大的等压梯度变化,挑檐山墙角部从 $+0.4$ 迅速递减到 -0.2 ,在屋脊处产生了 -0.8 的风压. 悬山挑檐的背风屋面与三角挑檐屋面和硬山挑檐屋面相比,平均风压系数变化比较大,在 $-1.2 \sim -0.4$.

不对称屋面与前 3 个模型相比,在迎风屋面更加明显地呈锥形分布,在挑檐山墙的角部有着更加密集的等压线分布,在 $-0.8 \sim 0.2$,其他部分则较为缓和;背风屋面全部呈现负压,分布更为平缓,平均风压系数在 $-0.8 \sim -0.4$.

上述 4 种双坡屋面的平均风压分布的差异主要是由于挑檐形式的不同影响所致. 不同挑檐形式对于屋面局部风荷载的影响主要集中在背风屋面屋脊附近,由于悬山挑檐屋面侧面山墙屋檐的存在,在 45° 风向角下在屋脊处的分离比其他没有侧面屋檐的屋面更加强烈,因而背风屋面靠近屋脊附近的区域产生的负压的绝对值也要比其他 3 种屋面大很多. 在迎风屋面部分,三角挑檐屋面和硬山挑檐屋面由于挑檐下表

面角度的不同导致来流风分离时产生的负压不同,三角挑檐屋面的挑檐边缘部分的负压的绝对值要比硬山挑檐屋面的大一些;不对称屋面的迎风屋面要比其他 3 种屋面大一些,屋面坡度也比较小,与迎风边缘的距离增大,来流风分离的强度明显减弱,坡度也小于 30° ,这使得它的迎风屋面的风压要明显小于其他的 3 种屋面,基本呈负压分布.

2.2 脉动风压系数分布

一般来说,某一风向角下某一点上的风压脉动水平可以用均方根风压系数来估算. 图 5—7 分别给出了 4 种双坡屋面在 2 种风场中 3 个风向角下的脉动风压系数分布图,从图中可以看出风向角、来流风的湍流度和屋面测点位置对脉动风压系数有较大影响.

从图 5 可以看出,三角挑檐屋面在 0° 风向角下的脉动风压系数的最大值在 $0.4 \sim 0.5$,出现在迎风屋面边缘区域,在极窄的角部区域会出现 0.5 ;背风屋面的脉动风压系数则相对较小且比较一致,最大仅为 0.2 左右. 45° 风向角下,则是在迎风屋面的山墙和挑檐连接的局部区域出现比较大的脉动值,在 $0.6 \sim 0.7$. 在 90° 风向角下,由于风的来流方向平行于屋脊线使得两片屋面的脉动风压呈对称分布,其最大值在 $0.6 \sim 0.8$,依然出现在屋面的挑檐与迎风山墙连接的角部. 其他 3 个双坡屋面的脉动压力分布也都有类似的规律.

图 6 显示的是以悬山挑檐屋面在 45° 风向角下不同风场条件中的脉动风压分布情况. 无论是在迎风屋面还是在背风屋面,其脉动风压分布图等压线的梯度变化在 C 类风场下明显比 B 类风场要大. 迎风屋面的最大脉动风压系数也是由 0.8 (B 类风场)

增大到 1.0(C 类风场),背风屋面则是由 0.6(B 类风场)增大到 0.8(C 类风场)。

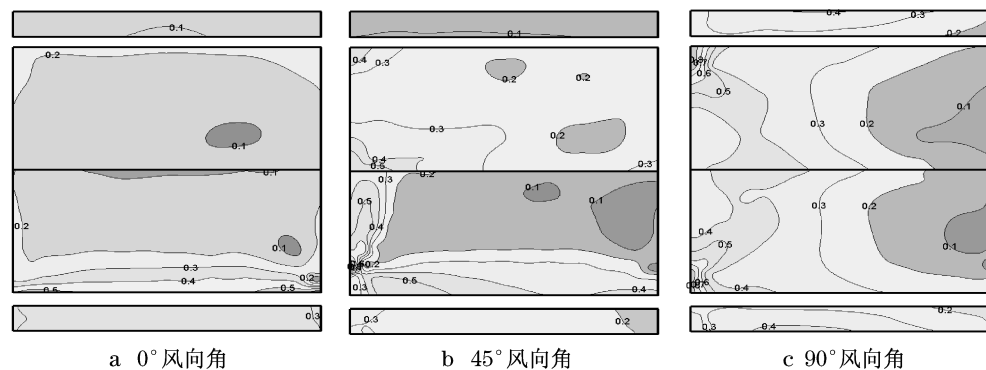


图 5 三角挑檐双坡屋面 B 类风场脉动风压分布图

Fig.5 Fluctuating pressure coefficients on trigonal-eaved gable roof in wind field of Type B

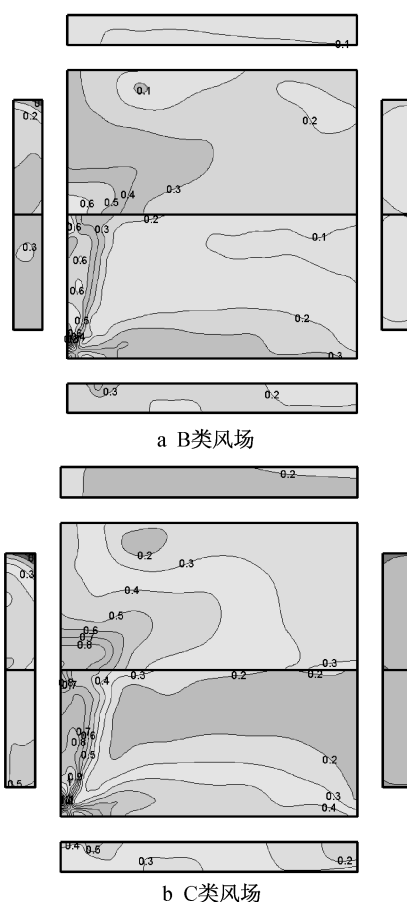


图 6 悬山挑檐双坡屋面 45° 风向角下的脉动风压分布图
Fig.6 Fluctuating pressure coefficients on Xuanshan-eaved gable roof at wind angle of 45°

不对称屋面与其他 3 个双坡屋面的主要区别在于屋面不对称,这会使其中一片屋面的坡度要略小于 30°。由图 6b 和图 7a 可以看出,同在 C 类风场 45° 风向角下,悬山双坡屋面和不对称屋面在迎风屋面上无论是从数值还是分布特征上都比较类似,最大的脉动风压系数也是 1.0;在背风屋面有些区别,虽

然脉动风压系数最大值都是出现在屋脊与山墙的连接区域,但是悬山屋面的最大值为 0.8,而不对称双坡屋面仅为 0.6。这主要是因为迎风屋面来流风中的湍流度是影响屋面脉动风压系数的主要因素,而背风屋面气流在屋脊处发生二次分离,屋面形式的不同导致了背风屋面脉动风压分布的不同。

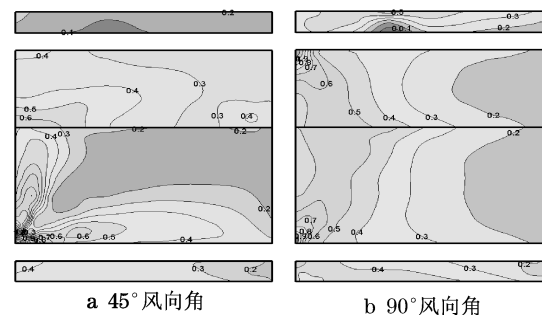


图 7 不对称双坡屋面 C 类风场下的脉动风压分布图
Fig.7 Fluctuating pressure coefficients on anisomerous gable roof in wind field of Type C

2.3 不同屋面类型典型点风压系数的定量比较

为了研究 4 种屋面的压力分布情况,选取 4 种屋面中线(如图 2 所示,其中 d 代表屋面中心测点到迎风屋面挑檐的投影距离, D 代表屋脊到屋面挑檐边缘的投影距离,当 $0 < d/D < 1$ 时代表迎风屋面的中线测点, $1 < d/D < 2$ 代表背风屋面的中线测点)上的测点风压系数进行对比。数据分析结果表明,4 种双坡屋面的屋面中线测点的风压系数(包括平均风压系数和脉动风压系数)无论是在 B 类风场还是在 C 类风场的各风向角下变化趋势一致,只是数值稍有不同。说明风场类型对于风压系数沿屋面的变化趋势影响很小,因此选择 B 类风场 0° 和 45° 风向角下的风压系数变化为例来说明。

从图 8a 可以看出,在 0° 风向角下,不对称屋面与其他 3 种屋面的变化趋势不同,在迎风屋面边缘差距尤为巨大,不对称屋面整个屋面的平均风压系数绝对值的最大值发生在迎风屋面边缘,而其他 3 种屋面则发生在背风屋面的边缘,可以看出坡度小于 30° 的迎风屋面上产生的吸力要大于 30° 坡度的屋面. 这主要是因为由于不对称屋面的迎风屋面斜坡角度较其他屋檐类型的屋面坡度小,导致气流在屋脊处的分离也小的缘故. 图 8b 中显示在 45° 风向角下 4 种双坡屋面除了在迎风屋面挑檐边缘有所不同外,其他部分沿着屋面中线的变化趋势基本一致,都是在背风屋面屋脊附近出现最小平均负压. 4 种屋面在迎风屋面的平均正压出现在硬山挑檐屋面 (45° 风向角) 上.

由图 8c 和 d 可以看出,无论是在 0° 风向角还是 45° 风向角,4 种屋面的脉动风压系数变化趋势基本

一致,在 0° 风向角下脉动风压在迎风屋面沿着屋面中线从迎风边缘到屋脊逐渐减小,在屋脊处达到最小值,然后在背风屋面逐渐升高,脉动风压系数最大值都是发生在迎风屋面边缘. 在 45° 风向角下,脉动风压变化趋势在迎风屋面同 0° 风向角一致,在背风屋面则是先升高后降低,在背风屋面中部的脉动系数要比屋脊附近和背风屋面挑檐边缘部分都大. 脉动风压的最大值依然出现在迎风屋面边缘,最小值出现在屋脊附近.

三角挑檐屋面和硬山挑檐屋面在屋面形状上完全相同,惟一的不同是在挑檐下表面的坡度上,而挑檐下表面的不同导致了这 2 种屋面在挑檐边缘的上表面的平均风压系数的不同,三角挑檐屋面挑檐边缘的屋面平均负风压的绝对值要大于硬山挑檐屋面,脉动风压系数也要稍大于硬山挑檐屋面,因而它比硬山挑檐屋面在屋檐边缘更容易产生破坏.

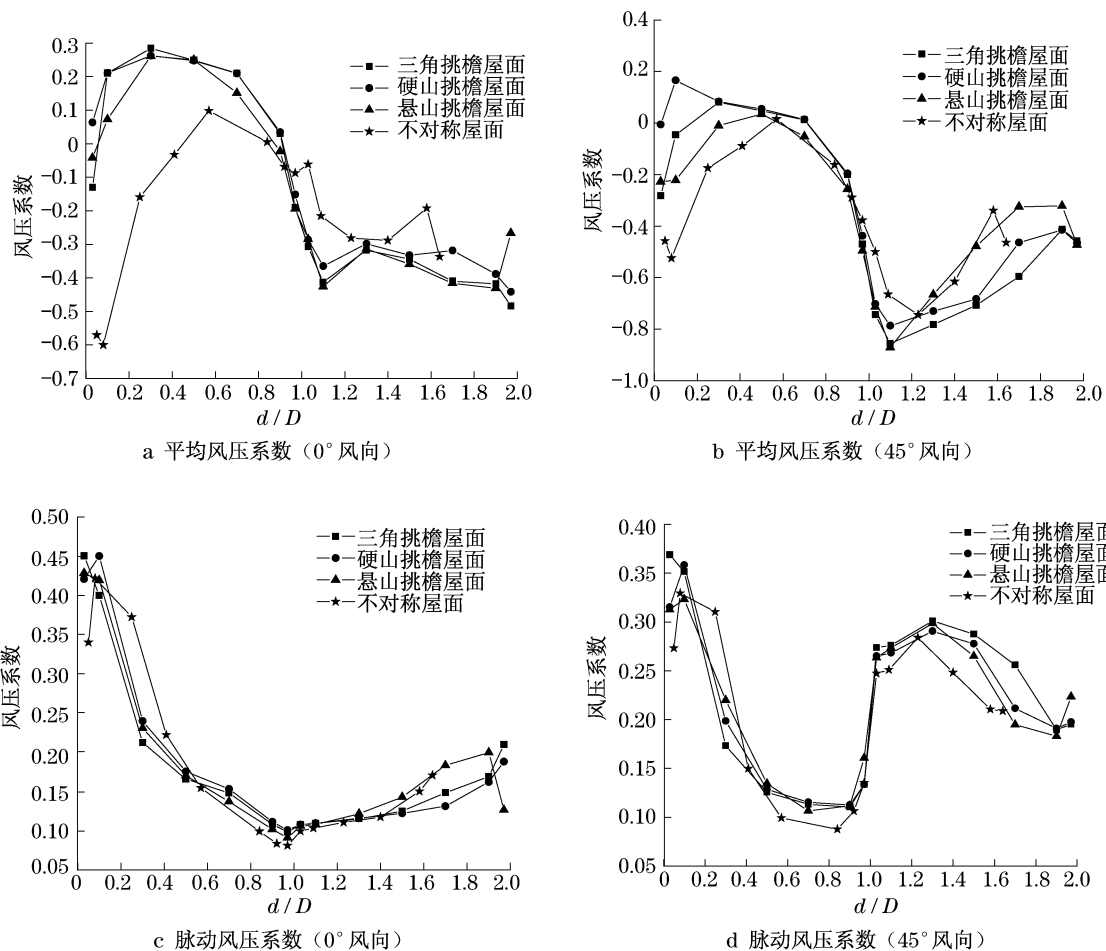


图 8 4 种屋面典型点风压系数的比较 (B 类风场)

Fig.8 The comparisons of wind pressure coefficients on typical taps on the four kinds of roofs

3 结论

(1) 风向垂直于屋脊时,4 种屋面形式的迎风面上的平均风压除挑檐的边角处外均呈现为正压,而背风屋面呈现为负压;在风向平行于屋脊时,整个屋面全部呈现为负压;风向与屋檐斜交时,屋面除局部区域平均风压偶尔出现正值外,绝大部分表现为负压.

(2) 在屋脊及屋面边缘附近的平均风压系数绝对值要比屋面内部区域大一些. 在针对屋面的结构设计中,屋面风压系数的取值应该分区设计.

(3) 脉动风压系数随湍流度增大而增大,一般在迎风屋檐附近比较大. 对于不对称屋面,当长屋面迎风时,在背风屋面产生的脉动风压系数较其他模型的小.

(4) 当风向垂直于屋脊时,前 3 种屋面的平均及脉动风压系数沿着屋面中线的变化趋势基本一致,仅不对称屋面与其他 3 种屋面差别较大,这说明屋檐形式的变化对于屋面整体的风荷载影响不大,但对于局部风荷载有一定的影响.

(5) 双坡屋面的挑檐形式的变化只会影响屋面的局部风压,对于屋面的整体风压则影响不大. 在迎风挑檐处,在屋檐上表面的负压和下表面的正压的共同作用下,三角挑檐屋面要比硬山挑檐屋面在挑檐边缘部分更容易受到破坏,结构设计中应该引起重视.

参考文献:

- [1] 石蓉蓉,雷媛,王东法,等. 1949—2007 年影响浙江热带气旋灾情分析及评估研究[J]. 科技通报,2008,24(5):612.
- SHI Rongrong, LEI Yuan, WANG Dongfa, et al. Analysis and assessment of TC disaster influencing Zhejiang Province from 1949 to 2007[J]. Bulletin of Science and Technology, 2008, 24(5):612.
- [2] Holmes J D. Wind loading of structures[M]. London: Spon Press, 2001.
- [3] 台州市建设规划局. 0414 号台风“云娜”台州民房倒塌调查报告[R]. 台州:台州市建设规划局, 2004.
- Taizhou Construction and Planning Bureau. NO. 0414 typhoon “yunna” houses collapsed survey report in Taizhou City[R]. Taizhou: Taizhou Construction and Planning Bureau, 2004.
- [4] 葛学礼,朱立新,于文,等. 浙江苍南县“桑美”台风建筑灾害与抗风技术措施[J]. 工程质量, 2006(10):18.
- GE Xueli, ZHU Lixin, YU Wen, et al. Building disaster caused by Saomei typhoon in Cangnan County, Zhejiang Province as well as the technical measure for anti-typhoon[J]. Quality of Civil Engineering and Construction, 2006(10):18.
- [5] Stathopoulos T. Turbulent wind action on low-rise buildings [D]. London: The University of Western Ontario. Faculty of Engineering Science, 1979.
- [6] Holmes J D. Wind pressure and force on tropical houses[R]. Melbourne: Australian Housing Research Council, 1980.
- [7] Holmes J D. Wind pressure on tropical housing[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 53:105.
- [8] Uematsu Y, Isyumov N. Wind pressures acting on low-rise building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 82:1.
- [9] 陈基发,金新阳,张相庭,等. GB 50009—2001 中国建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
- CHEN Jifa, JIN Xinyang, ZHANG Xiangting, et al. GB50009—2001 Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [10] Takashige Ishikawa, Hiromasa Kawai, Yukio Tamura, et al. AIJ recommendations for loads on building 2004 [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004.