

低矮房屋屋面细部构造的风荷载特性研究

陶玲, 黄鹏, 顾明, 全涌

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 通过刚性模型测压试验研究了低矮房屋屋面细部构造的风荷载特性。通过对不同高度和细部构造是否同时存在时屋脊、出山及檐沟风压系数及阻力系数的研究发现: 在来流斜风向吹向细部构造的外表面(屋脊为迎风面)时, 内侧表面(屋脊为背风面)端部负压变化剧烈, 幅值很大, 造成朝向屋面(屋脊为朝向背风面)的最不利极值净风压系数很大, 其中出山最大, 达到18.0左右, 屋脊次之, 为10.5左右, 檐沟最小, 为7.0左右; 而背离屋面(屋脊为朝向迎风面)方向的极值净风压则相对平稳。在同一竖直平面上, 出山位置较低的测点比较高的测点最不利极值净风压系数要大5左右, 檐沟则是大0.8左右; 屋脊和出山在另外2个细部构造存在时, 最不利极值净风压系数会减小很多, 分别从10.5和18.0减小到只有7.5和6.0, 檐沟减幅较小, 从7减小到6。出山和檐沟的最不利阻力系数的幅值随着高度的增加会加大, 当屋脊和檐沟存在后出山的最不利阻力系数的幅值会有所减小, 但另外2个细部构造是否存在对屋脊和檐沟的阻力系数影响较小。

关键词: 低矮房屋; 屋脊; 出山; 檐沟; 风洞试验; 最不利极值净风压系数; 阻力系数

中图分类号: TU312.1 TU317.1

文献标志码: A

Wind load on configuration details of low-rise building roof

TAO Ling, HUANG Peng, GU Ming, QUAN Yong

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

Abstract: This paper studied the loads on the configuration details of low-rise building roofs by the rigid model pressure measurement tests, which were often destroyed in wind disasters. The pressure coefficients and drag coefficients of the ridge, protruding gable wall and eaves gutter were examined, which were of varied heights and with or without the other 2 types of configuration details. The results show that the negative pressure of interior surface (the leeward surface for the ridge) of the configuration details end varies severely and the amplitude occurs when the wind obliquely blows to the exterior surface (the windward surface for the ridge), which leads to the very large worst peak net pressure coefficient towards the roof. The worst peak net pressure coefficients of the protruding gable wall, ridge and eaves gutter are about 18.0, 10.5 and 7.0, respectively. However the peak pressure away from the roof (towards the windward surface for the ridge) is relatively stable. The worst peak net negative pressure of the lower tap is 5 larger than that of the higher tap on the same vertical plan of the protruding gable wall, while that of the lower tap is only 0.8 larger than that of the higher tap for the eaves gutter. When the roof is equipped with the other 2 types of configuration details, the worst peak net negative pressure coefficients of the ridge and protruding gable wall decrease much to 7.5 and 6.0 from 10.5 and 18.0, respectively, while that of the eaves gutter decreases to 6 from 7. The worst peak drag coefficients of the ridge and eaves gutter are not affected by whether the roof is attached with the other 2 types of configuration details or not, while that of the protruding gable wall is smaller when the roof is attached with ridge and eaves gutter. The worst peak drag coefficients of the protruding gable wall and eaves gutter are larger with the increase of each height.

Keywords: low-rise building; ridge; protruding gable wall; eaves gutter; wind tunnel test; worst peak net pressure coefficient; drag coefficient

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178352)。

作者简介: 陶玲(1980—), 女, 安徽舒城人, 博士研究生。E-mail: tl800425@126.com

通讯作者: 黄鹏(1974—), 男, 湖南株洲人, 工学博士, 副研究员。E-mail: huangtju@tongji.edu.cn

收稿日期: 2011年6月

0 引言

根据对我国东南沿海农村住宅的调研^[1],其房屋以双坡屋面居多。由于东南沿海雨水较多,组织排水是房屋设计中一项比较重要的内容,而檐沟不仅满足排水的需要,还符合人们的审美要求,成为东南沿海双坡屋面上一种常见的细部构造。另外,屋脊(屋脊线上成型的砖砌屋脊加盖瓦)和出山(山墙高出屋面的部分)也是双坡屋面常用的屋面细部构造^[2]。从调研中可知,细部构造本身在风灾中也常有破坏,图1a为风灾中破坏的檐沟。对于带有出山、檐沟的双坡屋面的房屋(图1b为我国出山中的一种,也叫马头墙),国外研究鲜有涉及。2005年,Kopp^[3]详细论述了女儿墙的风荷载,但仅局限于平屋面。为了明确细部构造的风荷载状况,在同济大学TJ-2风洞实验室对不同高度的屋脊、出山及檐沟进行了刚性模型测压试验,对其风压系数和阻力系数进行了研究。

1 试验概况

文中选取的房屋基本模型的足尺长度 L 、宽度 B 及平均屋面高度 H 分别为14.4 m、12.0 m及10.6 m,屋面坡度 β 为18.4°。测压试验模型为刚体模型,见图2a(屋脊、出山及檐沟分别示意于图2a,模型各部分参数示于图2b)。刚体模型用有机玻璃板和ABS板制成,具有足够的刚度和强度,使得在1 m高度处的试验风速达12 m/s,模型不会发生变形,也不会出现明显的振动现象,以保证测压试验的精度。为了能更精确地制作细部,模型的几何缩尺比为1/20,与实物在外形上保持几何相似,风速比设为1/2,则相应的时间比约为1/10。根据村镇建筑的周围环境,本试验的大气边界层流场模拟为B类地面粗糙度风场^[4]。模拟的风场结果如图3所示,平均风速剖面指数 $\alpha = 0.16$ 。模型顶部(对应实际高度10 m处)紊流度约为22%。细部构造的测点布置及风向角见图4。试验时将模型放置在转盘中心,通过旋转转盘模拟不同风向。试验风向角间隔取为15°,按顺时针方向增加,共24个风向角。为了描述方便, ρ° 风向角时的迎风屋面和背风屋面均被称为迎风屋面和背风屋面。试验中扫描频率设置为312.5 Hz,一次采样57.6 s(对应实际约10 min)。

试验中基本模型不变,通过在该模型上增加不同的细部构造来改变工况。原型建筑屋脊、出山和檐沟的实际厚度分别为0.12 m、0.18 m及0.12 m,试验工况见表1,文中所提到的尺寸均为原型建筑尺

寸。细部构造的各尺寸都是根据我国东南沿海的房屋实际采用的尺寸^[2]并考虑了建筑模数选定的,其中檐沟高度0.40 m时,表示其外板和檐口平齐。不同的屋脊高度由于其高度的限制,均在中间高度布测点一排,考虑要和出山组合,其端部测点距端部的距离为0.2 m。出山高度在0.24 m和0.36 m时在中间高度布测点一排,在0.54 m时布测点2排,最下排和最上排测点分别距出山底部及顶部均为0.1 m,端部测点距端部0.1 m。檐沟测点在图4中示意了最高檐沟高度的布置方式(虚线表示其余两个檐沟高度),考虑端部厚度,端部测点距端部0.2 m,考虑底板厚度,最下排测点距檐沟底部0.2 m,最上排测点距檐沟顶部均为0.1 m。图中各测点均为双面测点,在宽度方向均匀布置。

表1 试验工况
Table 1 Test cases

工况	屋脊高度 h_r /m	出山高度 h_p /m	檐沟高度 h_e /m
1/2/3	0.12/0.18/0.24	0	0
4/5/6	0	0.24/0.36/0.54	0
7/8/9	0	0	0.40/0.64/0.94
10	0.12	0.24	0.64
11	0.24	0.54	0.94



(a) 风灾中破坏的檐沟



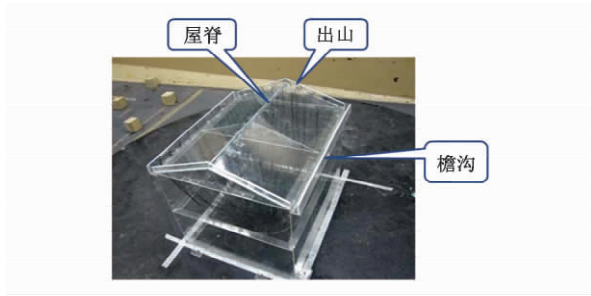
(b) 中国特色的出山(马头墙)

图1 中国特色的细部构造建筑
Fig. 1 Buildings with Chinese characteristic configuration details

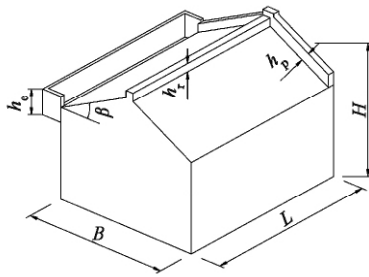
2 数据处理方法

2.1 风压系数

首先定义屋脊在0°风向角时对应的迎风面称为



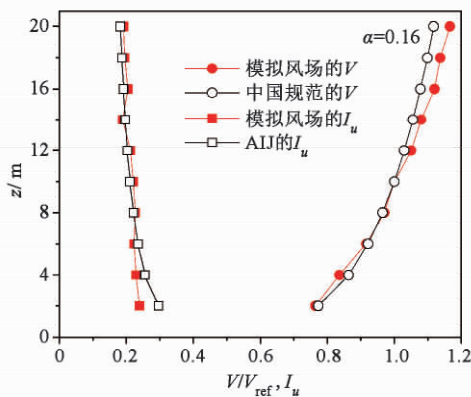
(a) 屋脊、出山及檐沟



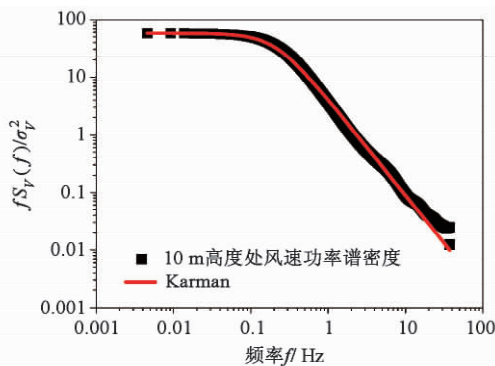
(b) 房屋各部分的参数定义(另外一侧的出山和檐沟没有画出)

图2 刚性模型和尺寸

Fig. 2 Rigid models and building dimensions



(a) 风速和湍流剖面



(b) 脉动风速功率谱密度

图3 风场模拟结果

Fig. 3 Parameters of simulated wind field

外表面,背风面称为内表面。出山和檐沟靠近屋面的面称为内表面,另一面为外表面。各细部构造上的净风压系数表示为:

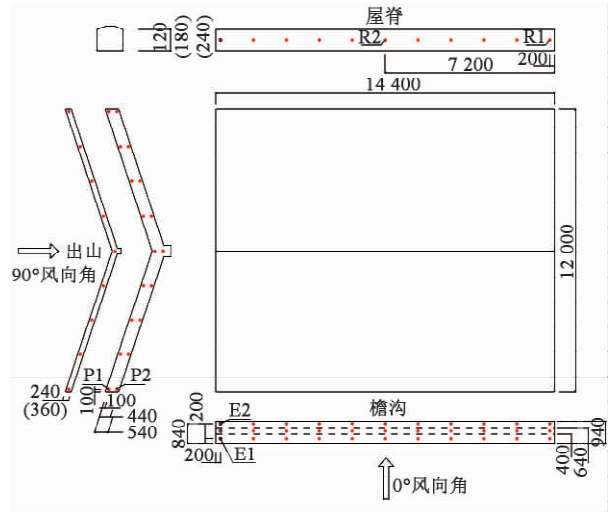


图4 测点布置及风向示意角

Fig. 4 Pressure taps layout and wind direction

$$C_p(i, \theta, t) = C_{pe}(i, \theta, t) - C_{pi}(i, \theta, t) \quad (1)$$

式中, $C_{pe}(i, \theta, t)$, $C_{pi}(i, \theta, t)$ 分别表示测点处在 t 时刻风向角 θ 下的外表面和内表面风压系数, 这里的参考风压为平均屋面高度处的 10 min 平均风压。定义屋脊上的风压使屋脊向背风面弯曲的方向为正, 反之为负。出山和檐沟上的风压使其向屋面方向弯曲为正, 反之为负。从而, 在内表面上的风压系数的相反数即 $-C_{pi}(i, \theta, t)$ 为净风压的正值。文中除了特殊说明外, 提到的风压均为净风压。极值风压系数 $C_{p, \max}(i, \theta)$ 和 $C_{p, \min}(i, \theta)$ 不是实际采样中的最大值和最小值, 是用 Sadek_Simiu 方法计算^[5-6]的极大值和极小值。

2.2 阻力系数

引进阻力系数来描述各细部构造整体的荷载状况。阻力系数为:

$$C_D(\theta, t) = \sum_{i=1}^n \frac{w_i h_i}{Wh} C_p(i, \theta, t) \quad (2)$$

式中: w_i 和 h_i 分别为测点在所测的细部构造面上分摊的宽度和高度, 2 个测点之间宽度或高度平均分配, 端部的宽度或高度分摊给端部点, W 和 h 为该细部构造的宽度和高度。 n 为所测面上共布置的测点数。则 $C_{D, \max}$, $C_{D, \min}$ 分别表示在所有风向角下的最不利极大阻力系数和最不利极小阻力系数。这里的风压系数都是净风压系数, 极值计算仍采用 Sadek_Simiu^[5-6]方法。

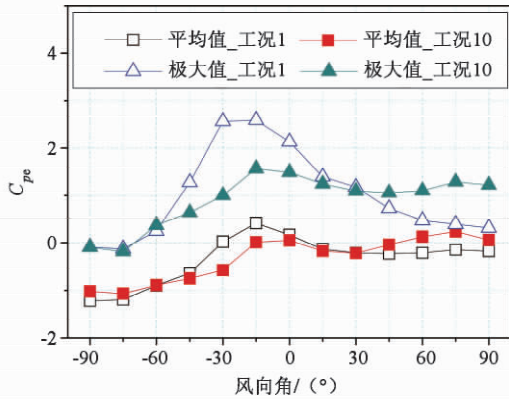
3 试验结果分析

3.1 风压系数

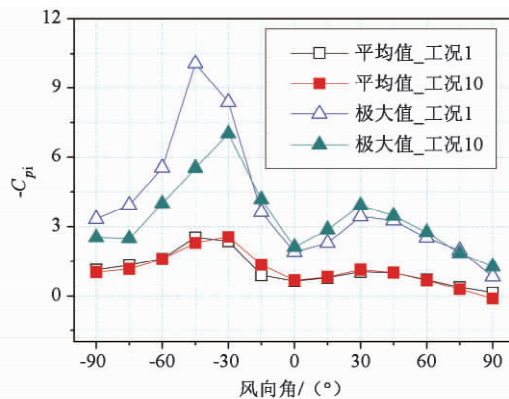
3.1.1 屋脊

以工况 1 ($h_r = 0.12 \text{ m}$, $h_p = 0$, $h_e = 0$) 和工况 10 ($h_r = 0.12 \text{ m}$, $h_p = 0.24 \text{ m}$, $h_e = 0.64 \text{ m}$) 的测试结果

进行对比分析。屋脊的端部测点(R1)内外表面的极大风压系数和平均风压系数随风向角变化的曲线如图5所示,考虑到模型的对称性,只需绘出 -90° (270°) $\sim 90^{\circ}$ 范围。从图5可以看出对于端部测点,外表面的风压系数随风向角的变化平缓,但是内表面的极大风压系数变化剧烈,在 -45° (315°)风向角左右时出现峰值,达到10.5左右。屋脊($h_r = 0.12\text{ m}$)的端部测点(R1)和中间测点(R2)的净风压系数随风向角变化曲线如图6所示。对比图5b和图6a可知,不论是极大风压系数还是平均风压系数,净风压系数在各个风向角下的值都和内表面的值较为贴近,随风向角的变化趋势也相同。从图5和图6a还可以看出,在有了出山和檐沟($h_p = 0.24\text{ m}, h_e = 0.64\text{ m}$)后,屋脊端部测点上的极大净风压系数峰值减小较多,只有7.5左右。图6b为中间测点的净风压系数,其极大风压系数在各个风向角下变化平缓,不会出现较大的峰值,且在有了出山和檐沟($h_p = 0.24\text{ m}, h_e = 0.64\text{ m}$)后,各风向角下的极大风压系数和平均风压系数略有减小。



(a) 端部测点 R1 外表面

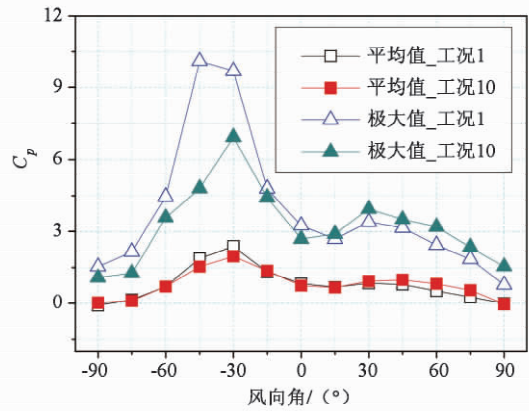


(b) 端部测点 R1 内表面

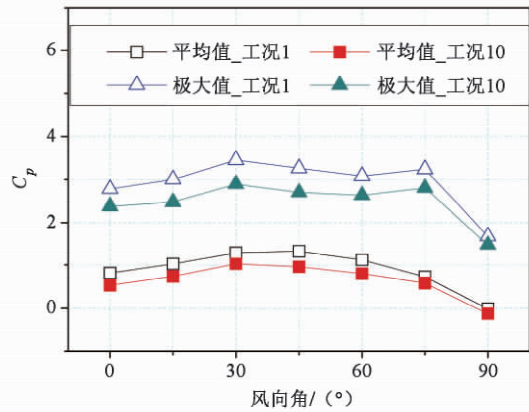
(工况1: $h_r = 0.12\text{ m}, h_p = 0, h_e = 0$; 工况10: $h_r = 0.12\text{ m}, h_p = 0.24\text{ m}, h_e = 0.64\text{ m}$)

图5 屋脊端部风压系数随风向角的变化曲线

Fig.5 Variation of pressure coefficients of ridge end with different wind direction



(a) 端部测点 R1



(b) 中间测点 R2

(工况1: $h_r = 0.12\text{ m}, h_p = 0, h_e = 0$; 工况10: $h_r = 0.12\text{ m}, h_p = 0.24\text{ m}, h_e = 0.64\text{ m}$)

图6 屋脊净风压系数随风向角的变化曲线

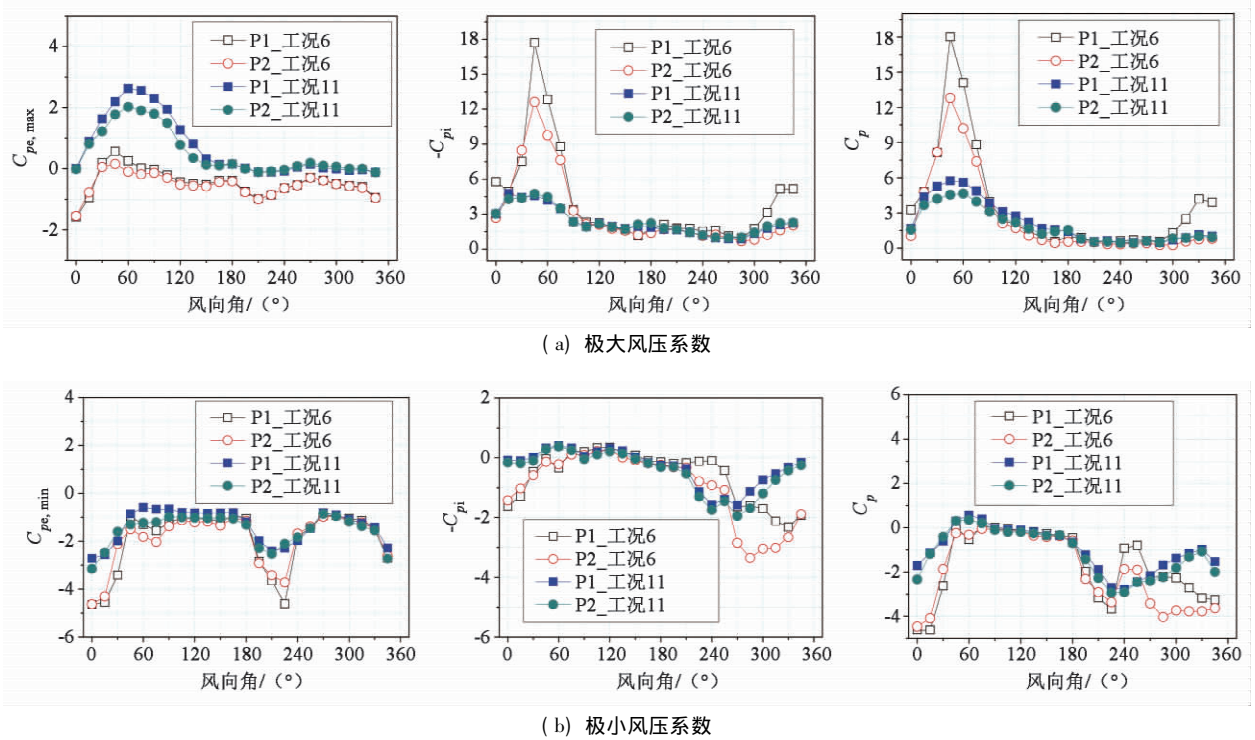
Fig.6 Variation of net pressure coefficients of ridge with different wind direction

3.1.2 出山

以工况6($h_r = 0, h_p = 0.54\text{ m}, h_e = 0$)和工况11($h_r = 0.24\text{ m}, h_p = 0.54\text{ m}, h_e = 0.94\text{ m}$)测试结果进行对比分析。出山端部的下面测点P1和上面测点P2(测点位置见图4)的极大风压系数和极小风压系数随风向角变化的曲线如图7所示。从图7a可以看出,极大风压系数的净风压系数的变化趋势也是和内表面的极大风压系数一致,其波动也较大,在 45° 风向角时,极大风压系数达到峰值18.0。在同一竖直面上,下面测点P1的极大风压系数峰值大于上面测点P2。在有了屋脊和檐沟($h_r = 0.24\text{ m}, h_e = 0.94\text{ m}$)后,极大风压系数的峰值大幅减小,峰值从18.0减小到6.0左右,且P1、P2测点的峰值差别较小。极小风压系数的峰值相对于极大风压系数的峰值要小很多,约只有4.5,其对测点的高度不太敏感,但在有了屋脊和檐沟后幅值还是有所减小。

3.1.3 檐沟

以工况9($h_r = 0, h_p = 0, h_e = 0.94\text{ m}$)和工况11



(工况6: $h_r = 0, h_p = 0.54 \text{ m}, h_e = 0$; 工况11: $h_r = 0.24 \text{ m}, h_p = 0.54 \text{ m}, h_e = 0.94 \text{ m}$)

图7 出山端部测点极值风压系数随风向角的变化曲线

Fig.7 Variation of peak pressure coefficients of protruding gable wall end with different wind direction

($h_r = 0.24 \text{ m}, h_p = 0.54 \text{ m}, h_e = 0.94 \text{ m}$) 测试结果进行对比分析。檐沟端部的下面测点 E1 和上面测点 E2(测点位置见图4)净风压的极大风压系数和极小风压系数随风向角的变化曲线如图8所示。从图8a可以看出,极大风压系数在 15° 时出现峰值,最大为7.0左右。在同一竖直面上,下面的测点E1的极大风压系数比上面的测点E2要大一些。在有了屋脊和出山(工况11: $h_r = 0.24 \text{ m}, h_p = 0.54 \text{ m}$)后,极大风压系数峰值减小到6.0左右。极小风压系数的峰值相对于极大风压系数也要小一些,约只有4.5。檐沟内外表面极值风压相对于净风压的极值风压变化规律相似,不再列出。

从屋脊、出山和檐沟的各自端部点的净风压极大风压系数峰值来看,出山的值最大,达到18.0,屋脊次之,为10.5左右,檐沟最小,为7.0左右。但是在有了其它细部构造后,各自的峰值都有不同程度的减小,出山减幅最大,减到只有6.0左右,屋脊减小到约7.5,檐沟减小到6.0左右,使得三者的极大风压系数峰值为6.0~7.5,且三者的峰值均是出现在风向角为 45° ,来流斜向于其外表面(屋脊为迎风面)。出山与平屋面上孤立的女儿墙^[3]相似,不可避免地,在它的端部会产生较大的风压;而且坡屋面均是高于出山的端部,这就使气流没有缓冲的余地,在出山的端部出现很大的风压。而屋脊和檐沟(外板)

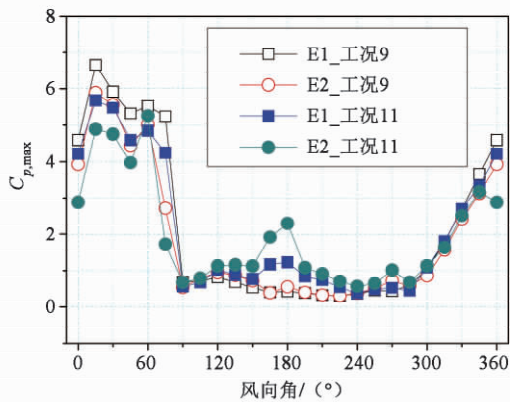
虽然也类似于平屋面上孤立的女儿墙,但是坡屋面比屋脊的端部要低,而檐沟的外板和内板之间有宽度,这可以使屋脊和檐沟端部的气流有缓冲的余地,端部风压不致太大。当屋面上同时有屋脊、出山和檐沟后,这些细部构造就相当于平屋面上的四周女儿墙^[3],它们的端部风压不会太大,因为其相互连接,在风斜吹向其外表面时,不会像孤立时内表面会出现较大的气流。对出山和檐沟的中间测点风压也作了分析,其相对于端部测点的趋势和屋脊类似。

3.2 阻力系数

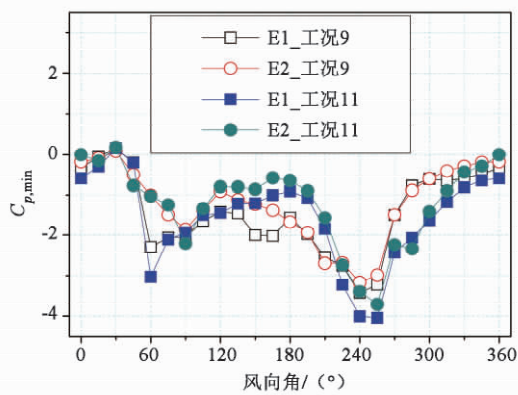
图9为不同屋脊高度的最不利极大和平均阻力系数。从图中可以看出,从 $h_r = 0.12 \text{ m}$ 增高到 $h_r = 0.18 \text{ m}$,最不利极大阻力系数有所减小,但是增大到 $h_r = 0.24 \text{ m}$ 又开始增大。可能是因为屋脊高度 $h_r = 0.12 \text{ m}$ 较低,有窝风效应,产生较大的值,实际的趋势还是屋脊较高,最不利极大和平均阻力系数较大,而出山和檐沟对其影响并不是很大。

图10为不同出山高度的最不利极大和极小阻力系数。从图中可以发现,出山高度增大,最不利极大阻力系数不断增大,但在有了屋脊和檐沟后,会有所减小,且不同的高度值变化不大。最不利极大值的幅值都比最不利极小值的幅值大,且极小值受高度和有无其它细部构造影响不明显。

图11为不同檐沟高度的最不利极大和极小阻力



(a) 极大风压系数

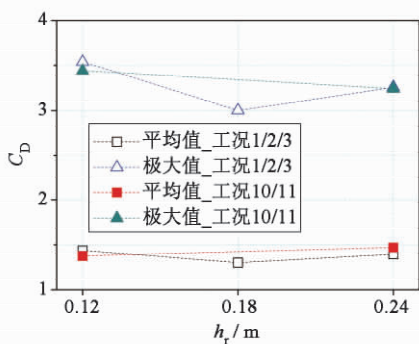


(b) 极小风压系数

(工况9: $h_r = 0, h_p = 0, h_e = 0.94$ m; 工况11: $h_r = 0.12$ m, $h_p = 0.54$ m, $h_e = 0.94$ m)

图8 檐沟端部测点静风压极值风压系数随风向角的变化曲线

Fig.8 Variation of peak pressure coefficients of eaves gutter end with different wind direction

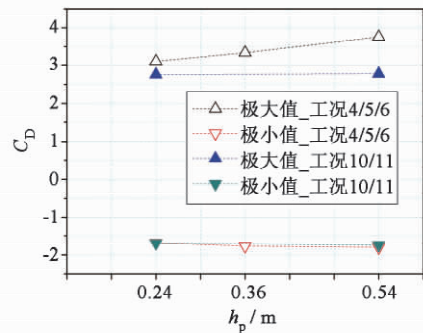


(工况1/2/3: $h_r = 0.12$ m/0.18 m/0.24 m, $h_p = 0, h_e = 0$; 工况10: $h_r = 0.12$ m, $h_p = 0.24$ m, $h_e = 0.64$ m; 工况11: $h_r = 0.24$ m, $h_p = 0.54$ m, $h_e = 0.94$ m)

图9 不同高度时的屋脊阻力系数

Fig.9 Drag coefficients of ridge with varied heights

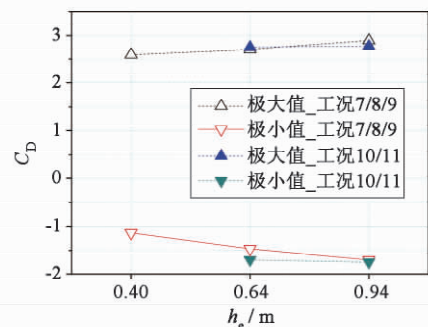
系数。从图中可以发现,檐沟高度增大,最不利极大阻力系数不断增大,最不利极小阻力系数不断减小。有了屋脊和出山后,阻力系数基本未变,但极大值的



(工况4/5/6: $h_r = 0, h_p = 0.24$ m/0.36 m/0.54 m, $h_e = 0$; 工况10: $h_r = 0.12$ m, $h_p = 0.24$ m, $h_e = 0.64$ m; 工况11: $h_r = 0.24$ m, $h_p = 0.54$ m, $h_e = 0.94$ m)

图10 不同高度时的出山阻力系数

Fig.10 Drag coefficients of protruding gable wall with varied heights



(工况7/8/9: $h_r = 0, h_p = 0, h_e = 0.40$ m/0.64 m/0.94 m; 工况10: $h_r = 0.12$ m, $h_p = 0.24$ m, $h_e = 0.64$ m; 工况11: $h_r = 0.24$ m, $h_p = 0.54$ m, $h_e = 0.94$ m)

图11 不同高度时的檐沟阻力系数

Fig.11 Drag coefficients of eaves gutter with varied heights

幅值还是大于极小值的。

从上面的分析可知,屋脊、出山和檐沟的高度增加,其最不利极大阻力系数都会增大,所以在实际的房屋中,对其取值不应过大。当其它细部构造增加时,对屋脊和檐沟的影响不是很大,而对出山有些影响。这是因为屋脊本来就是屋面中最高的部分,出山的增加仅仅会对其端部的风压产生较小影响,而檐沟本来就是屋面中最低的部分,出山的增加也仅仅对其端部略微产生影响;而对于出山,屋脊高于它,檐沟也与其端部齐平,它们的增加就使其整体风压减小,从而阻力系数变小。

4 结论

通过对不同高度的屋脊、出山和檐沟的刚性模型测压试验和结果分析可以得到以下结论:

(1) 在来流斜风向吹向细部构造的外表面(屋脊

为迎风面)时,内侧表面(屋脊为背风面)端部负压变化剧烈,幅值很大,造成朝向屋面(屋脊为朝向背风面)的最不利极值净风压系数很大,其中出山最大,达到约18.0,屋脊次之,约为10.5,檐沟最小,为7.0左右;而背离屋面(屋脊为朝向迎风面)方向的极值净风压则相对平稳。同一竖直平面上,出山位置较低的测点比较高的测点最不利极值净风压系数要大5左右,檐沟仅大0.8左右。

(2) 屋脊和出山在另外2个细部构造存在时,最不利极值净风压系数会减小很多,分别从18.0和10.5减小到只有6和7.5,而檐沟则是从7减小到6左右。

(3) 出山和檐沟的最不利阻力系数的幅值随着高度的增加会加大,出山的最大值达到4左右,当存在屋脊和檐沟后出山的最不利阻力系数幅值会有所减小,减小到3左右,和檐沟的最大和阻力系数幅值大小相当;但另外2个细部构造的存在对屋脊和檐沟的阻力系数影响较小。

(4) 从三者的最不利荷载区域来看,都是端部大于中间,说明风灾中,端部更容易破坏。从其阻力系数来看,都是高度越大越不利,可以得出在实际的房屋中,细部构造不应过高。从出山和檐沟的风压系数和阻力系数来看,均是极大值的幅值大于极小值的幅值,也就是如果在风灾中,出山和檐沟的倒塌方向均是朝着屋面的,这样会引起屋面的破坏,对其抗风的设计更显重要。

参 考 文 献

- [1] 黄鹏,陶玲,全涌,顾明. 浙江省沿海地区农村房屋抗风情况调研[J]. 灾害学,2010,25(4):90-95. (Huang Peng, Tao Ling, Quan Yong, Gu Ming. Investigation of wind resistance performance of rural houses in coastal area in Zhejiang Province[J]. Journal of Catastrophology, 2010, 25(4): 90-95. (in Chinese))
- [2] 浙江省建筑标准图集. 2005 浙 J15 瓦屋面[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2005.
- [3] Mans C, Kopp G A, Surry D. Wind effects of parapets on low buildings: part 3: parapet loads[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(11): 857-872.
- [4] GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 2006 版. 北京: 中国建筑工业出版社,2006. (GB 50009—2001 Load code for the design of building structures [S]. 2006 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese))
- [5] 陶玲,黄鹏,顾明,全涌. L形平面低矮房屋屋面的风荷载特性[J]. 同济大学学报,2011,39(11):1586-1591. (Tao Ling, Huang Peng, Gu Ming, Quan Yong. Wind loading characteristic of low-rise buildings roof with L-shape plan [J]. Journal of Tongji University, 2011, 39(11): 1586-1591. (in Chinese))
- [6] Sadek F M, Simiu E. Peak non-Gaussian wind effects for database-assisted low-rise building design [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2002, 128(5): 530-539.