

外形几何参数对低矮建筑双坡屋盖 升力系数极值的影响

全涌¹, 顾明¹, 陈斌²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 杭州市市政设施监管中心, 浙江杭州 321000)

摘要: 对一系列低矮建筑双坡屋盖的刚性模型测压风洞试验数据进行了处理, 研究了屋盖升力系数极值的特征, 讨论了最不利屋盖升力系数随建筑外形几何参数的变化规律。研究表明, 屋盖坡角的变化对最不利屋盖升力系数有重要影响: 对高宽比相同的低矮建筑, 屋面最大升力系数随屋盖坡角增大而减小, 且建筑的厚宽比越大, 这种趋势越剧烈; 最不利屋盖升力系数随着建筑高宽比的增大而增大, 但这种增大的趋势随着屋盖坡角的增大而减小。基于这些数据, 用多参数最小二乘法将最不利屋盖升力系数拟合成了屋盖坡角、建筑高宽比和厚宽比的函数形式, 并对拟合函数进行了误差分析。所得结论及拟合公式可为低矮建筑的结构设计及相关荷载规范的制订和修改提供参考。

关键词: 低矮建筑; 双坡屋盖; 风洞试验; 升力系数极值

中图分类号: TU312.1 文献标志码: A

Effects of geometrical parameters on extreme uplift force coefficients on gable-roofs of low-rise buildings

QUAN Yong¹, GU Ming¹, CHEN Bin²

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Hangzhou Municipal Installation Supervision and Administration Center, Hangzhou 310003, China)

Abstract: The pressure measurement wind tunnel test data of a series of low-rise building models were processed. The extreme uplift force coefficients on the roofs were studied. The effects of geometrical parameters on the most unfavorable uplift force coefficients on the gable roofs of low-rise buildings were discussed in this paper. Some new conclusions were drawn from the results. Fixing the ratio of height over width, the most unfavorable uplift force coefficients decrease with the increase of roof pitches and such tendency becomes more dominant with the increase of the ratio of depth over width. The most unfavorable uplift force coefficients increase with the increase of the ratio of height over width and the tendency is recessive for a large roof pitch. Based on those data, the most unfavorable uplift force coefficients are fitted as a function of the roof pitch, aspect ratio and side ratio with the Multi-parametrical Least Squares Method. These conclusions and the fitted function are useful references for wind loads standards and structure design of low-rise buildings.

Keywords: low-rise building; gable-roof; wind tunnel test; extreme values of uplift force coefficients

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAJ06B05, 2008BAJ08B14) 国家自然科学基金创新研究群体项目(50621062)。

作者简介: 全涌(1971—) 男, 重庆人, 工学博士, 副教授。E-mail: quanyong@mail.tongji.edu.cn

收稿日期: 2009年8月

0 引言

风灾调查表明^[1-2],在强风作用下低矮建筑整个屋面被掀起的情况很常见,因此考察整个屋面升力系数极值的规律,为设计提供有效参考,具有现实意义。目前,对于屋盖升力系数的研究大多集中在大跨度屋盖方面,而针对低矮建筑屋盖升力系数的研究开展得不多。文献[3]通过风压测量风洞试验研究了作用在整个屋盖结构上的脉动风压信息。由于当时的测压设备无法同步测量大量测点上的风压,整个屋盖上的脉动风压并不能直接获得,而是利用测点风压协方差积分的方式计算得到。文献[4]研究了基于数据库的低矮建筑屋盖上升力系数时程的模拟方法,该方法必须依赖给定的数据库才能算出需要的风荷载数据。文献[5]指出东京工业大学低矮建筑刚性模型测压风洞试验数据库(http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/lowrise/mainpage.html)给出了不同外形参数的双坡低矮建筑的表面风压的风洞试验时距,但仅仅是数据的罗列。本文对这些数据进行整理归纳,给出了屋盖升力系数极值并讨论了其随建筑几何形状参数的变化规律,得到了一些有意义的结论。在此基础上,将屋盖升力系数极值拟合成为屋盖坡角、建筑的高宽比和厚宽比的函数形式。所得结论及拟合公式具有一定的实用价值,可为低矮建筑的结构设计及相关荷载规范的制订和修改提供参考。

1 风洞试验概况

本文压力测量风洞试验数据来源于日本东京工艺大学的低矮建筑气动数据库^[5],其相应的风洞试验是在该校的大气边界层风洞中进行的。该风洞试验段宽2.2m,高1.8m。空风洞最大试验风速15m/s。本试验长度、风速和时间比尺分别取1/100、1/3和3/100。试验选择郊区风场作为试验风场,即日本荷载规范AIJ(2004)中的Ⅲ类风场,平均风速剖面指数为0.20,10m高度处的湍流强度为0.25左右。10cm高度处的试验风速为7.3m/s左右,对应于实际10m高度处设计风速22m/s。

试验采用由有机玻璃制成的刚性测压模型,图1给出了试验模型及其参数和坐标轴的定义。一共对108个双坡屋面建筑模型进行了表面压力测量风洞试验。模型高宽比(H_0/B)分别为1/4、2/4、3/4和4/4,厚宽比(D/B)分别为2/2、3/2和5/2,屋盖坡角(β)分别为:0°、4.8°、9.4°、14°、18.4°、21.8°、26.7°、30°和45°,如表1所示。风向角(θ)为0°到90°,增

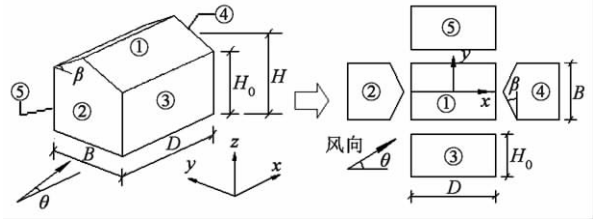


图1 试验模型及其几何参数定义和坐标轴定义

Fig. 1 Test model, geometrical parameters and coordinate system

表1 低矮建筑风洞试验模型工况表
Table 1 Wind tunnel test model cases of low-rise buildings

屋面类型	宽度 B/m	厚度 D/m	屋檐高度 H_0/m	屋盖坡角 $\beta/(\circ)$
双坡顶	16	16	4, 8, 12, 16	0, 4.8, 9.4
		24	4, 8, 12, 16	14, 18.4, 21.8
		40	4, 8, 12, 16	26.7, 30, 45

量为15°,共7个角度,总共756个试验工况。

试验中扫描阀扫描频率设置为500Hz,一次采样18s(对应实际10min),每一试验工况采样10次或18次。由得到的风压时程序列,根据下面公式计算得到测点风压系数时程:

$$C_p(i, \theta, t) = p(i, \theta, t) / (0.5\rho V_H^2) \quad (1)$$

其中, $C_p(i, \theta, t)$ 和 $p(i, \theta, t)$ 分别为风向角为 θ 时测点*i*处的风压系数及风压的时间序列,以指向屋盖方向为正, $0.5\rho V_H^2$ 为平均屋盖高度处来流风压。

本文所指的屋盖升力系数由试验模型屋盖测点的风压系数进行空间平均得到,其计算式如下:

$$C_f(\theta, t_k) = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_p(\theta, i, t_k) \quad (2)$$

其中: $C_p(\theta, i, t_k)$ 为某试验工况模型屋盖第*i*个测点,在风向角 θ 下, t_k 时刻的风压系数; n 为此模型工况屋盖上的测点数(所有测点均匀布置在屋盖上); $C_f(\theta, t_k)$ 为此模型工况在风向角 θ 下 t_k 时刻屋盖升力系数,以向上为正。

得到屋盖升力系数时程 $C_f(\theta, t_k)$ 后,某一风向工况下屋盖升力系数的极值 $C_{f,max}(\theta)$ 计算如下:

$$C_{f,max}(\theta) = \max_{k=1-M} C_f(\theta, t_k) \quad (3)$$

对同一试验工况下10次采样数据进行处理得到10个屋盖升力系数的极值 $C_{f,max}(\theta)$,取平均值为 $\bar{C}_{f,max}(\theta)$ 。在此基础上,所有风向角下最不利屋盖升力(表现为吸力)系数 $\hat{C}_{f,max}$ 计算式如下:

$$\hat{C}_{f,max} = \max_{\theta=0^\circ-90^\circ} \bar{C}_{f,max}(\theta) \quad (4)$$

由于上述升力系数极值 $\bar{C}_{f,max}(\theta)$ 和最不利升力系数 $\hat{C}_{f,max}$ 都是以平均屋盖高度处的来流风压为参考风压进行无量纲化处理的,对应于屋盖体型系数。

2 屋盖升力系数极值 $\bar{C}_{f,max}(\theta)$

图2给出了所有108个模型工况屋盖升力系数极值随风向角变化的曲线,其中每一小图表示高宽比和厚宽比相同但屋盖坡角不同的模型的试验结果,每一行小图表示高宽比相同但厚宽比不同的模型工况,每一列小图表示厚宽比相同但高宽比不同的各模型工况。

(1) 屋盖坡角 β 的影响

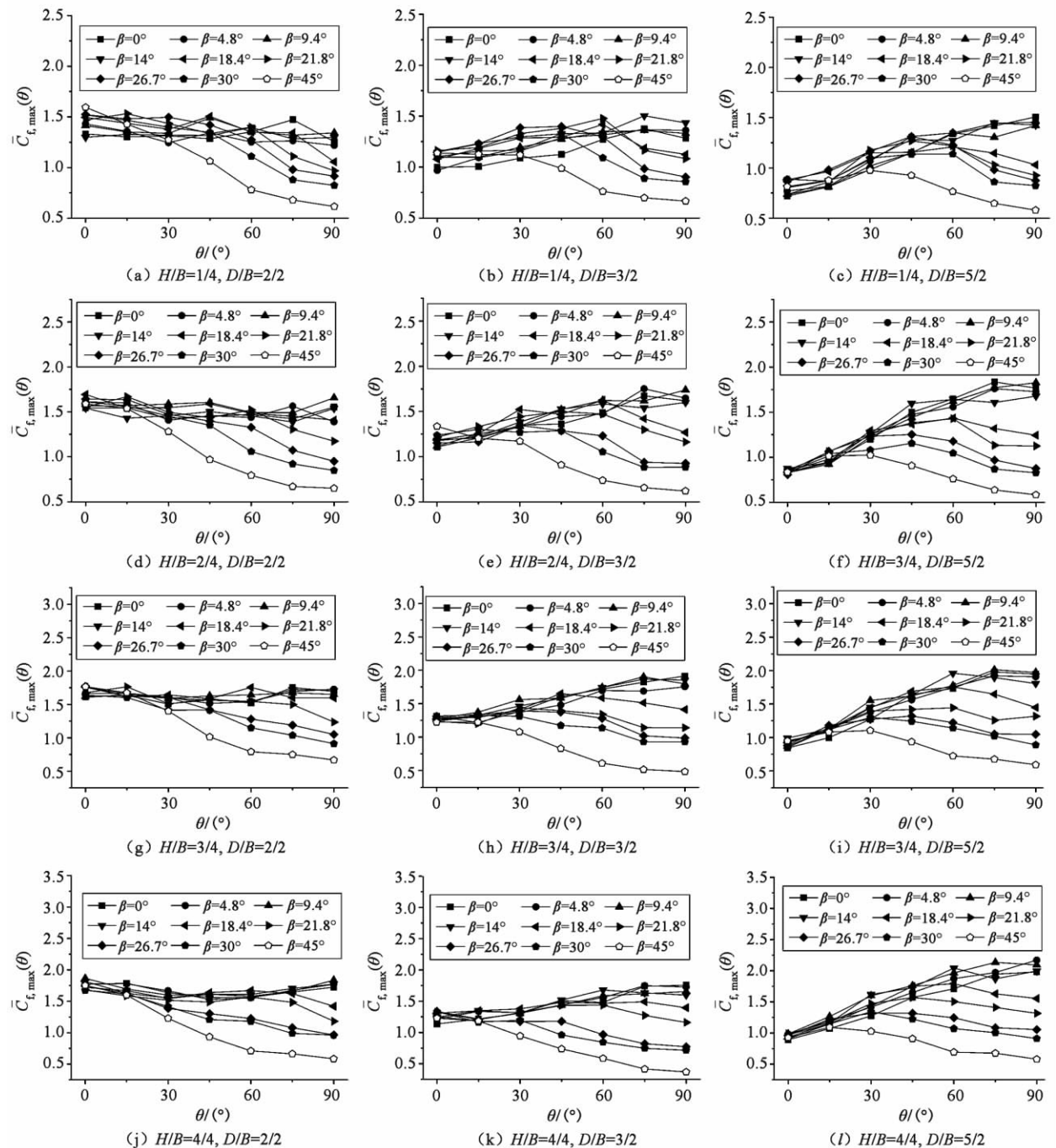


图2 屋盖升力系数极值随风向角的变化

Fig. 2 Extreme values of uplift force coefficients on roofs for different wind directions

从图2可以看出,不论高宽比和厚宽比如何变化,屋盖坡角越大,屋盖升力系数极值受风向角的影响越大。

风向角为 0° 时,几乎所有小图中代表不同屋盖坡角试验结果的各项曲线都汇集在一起,表明此时屋盖升力系数极值几乎不受屋盖坡角的影响。

当风向角由 0° 向 90° 变化时,各条曲线渐渐散开,屋盖坡角大的模型工况屋盖升力系数逐渐减小,坡角小的工况则不变或者有小幅增大。在所有12个小图中可以看到,坡角小于等于 14° 的屋盖升力系数

极值曲线都拧在一起,表明不论风向角如何变化,小坡角的屋盖升力系数极值几乎不随坡角的变化而变化。这是因为小坡角范围内的变化不会引起气流动态的改变,整个屋盖上总的升力系数不会有明显的改变。

在90°风向角处,当坡角大于14°时,屋盖升力系数极值随坡角的增大而减小,这是因为迎风坡的吸力将随坡角的增大而减小。

(2) 高宽比 H/B 的影响

图2a、2d、2g和2j中,风向角为0°时各曲线的汇聚点分别为1.45、1.59、1.70和1.75,呈逐渐增大趋势。图2b、2e、2h、2k和图2c、2f、2i、2l具有同样的规律,这表明风向平行于屋脊时,屋盖升力系数极值随高宽比的增大逐渐增大。

由图2a、2d、2g、2j(高宽比在1/4、2/4、3/4和4/4依次变化)可以发现,当风向角为90°时,屋盖升力系数极值分别在0.62~1.34、0.65~1.66、0.67~1.73和0.58~1.84中变化,变化范围逐渐向更大的升力系数方向移动。图2b、2e、2h、2k和图2c、2f、2i、2l也体现出同样的趋势。

当模型的高度 H 增大时,屋盖离地高度越高,来流的湍流强度越小,可导致测点吸力风压系数极值减小,但湍流减小导致各测点处风压脉动的相关性增强,从而导致整个屋盖升力系数的增大。

(3) 厚宽比 D/B 的影响

由图2a、2d、2g、2j可以发现,当风向角为0°时,各曲线的汇聚点分别为1.45、1.09和0.80,其值急剧减小。其它各图具有同样的规律,这表明风向平行于屋脊时,屋盖升力系数极值随屋盖厚宽比的增大急剧减小,这是由屋盖上方分离泡影响区域的面积占屋盖总面积的比例随屋盖顺风向长度 D 的增大而减小造成的。

风向角为90°时,各图中屋盖升力系数极值比较离散,将这些离散点数值进行平均后发现,该平均值受 D/B 值的影响很小,可以忽略不计。

3 最不利屋盖升力系数 $\hat{C}_{f,max}$

从图2中可以看出,发生最不利屋盖升力系数 $\hat{C}_{f,max}$ (即任意风向角下屋盖升力系数极值的最大值)的风向角变化比较复杂。厚宽比较大 ($D/B \geq 3/2$) 的小坡角 ($\beta \leq 14^\circ$) 屋盖的最不利屋盖升力系数发生在较大的风向角75°和90°时。当厚宽比较大且屋盖坡角较大时,最不利屋盖升力系数发生在比较小的风向角工况,如45°坡角的最不利屋盖升力系数都发生在风向角0°或者15°。屋盖坡角较小且建筑厚宽比 D/B 也较小时,屋盖升力系数极值受风向角的影响很小,最不利屋盖升力系数所在的风向角比较散乱。

图3~5分别分析了屋盖坡角、高宽比和厚宽比对最不利屋盖升力系数的影响规律。

(1) 屋盖坡角 β 的影响

图3分析了最不利屋盖升力系数随屋盖倾角变化的情况。总体上看,最不利屋盖升力系数在1.0到2.2之间变化,大多数情况下随屋盖坡角的增大呈减小趋势。当 $D/B = 2/2$ 且 $H/B = 4/4$ 时,最不利屋盖升力系数基本上不随屋盖坡角的变化而变化,保持在1.8左右。当高宽比下降时,最不利屋盖升力系数不再保持不变,而是在1.4到1.8之间变化,随屋盖坡角的增大而增大,且高宽比越小,这种趋势越明显。当 $D/B = 3/2$ 和 $5/2$ 时,屋盖坡角的增大将使最不利屋盖升力系数减小,且高宽比 H/B 越大或厚宽比 D/B 越大,这种趋势越明显。

(2) 高宽比 H/B 的影响

图4给出了最不利屋盖升力系数随高宽比变化的情况。在厚宽比 $D/B = 2/2$ 时,不管屋盖坡角怎样,最不利屋盖升力系数都将随高宽比的增大而增大,在1.4和1.9之间变化。当厚宽 $D/B = 3/2$ 时,最不利屋盖升力系数并不都表现为高宽比的单调函数形式,而是先随高宽比的增大而增大,当高宽比增

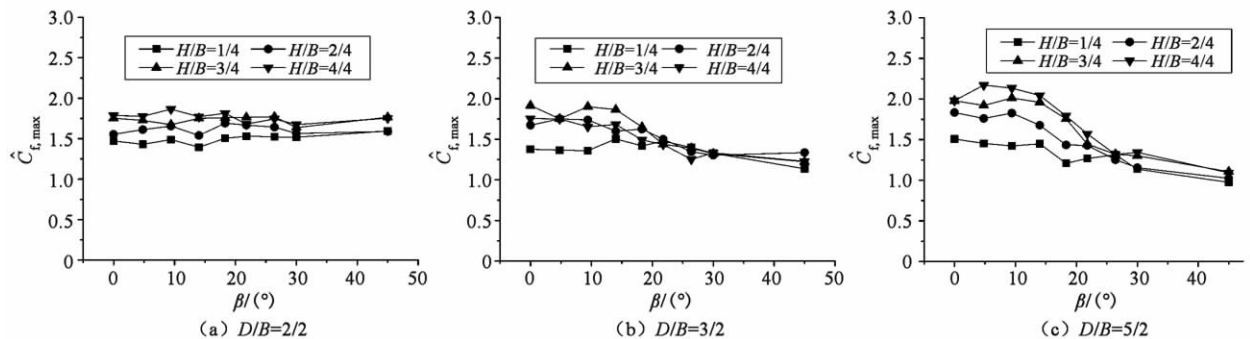


图3 屋盖坡角对最不利屋盖升力系数的影响

Fig. 3 Most unfavorable uplift force coefficients on roofs for different roof pitches

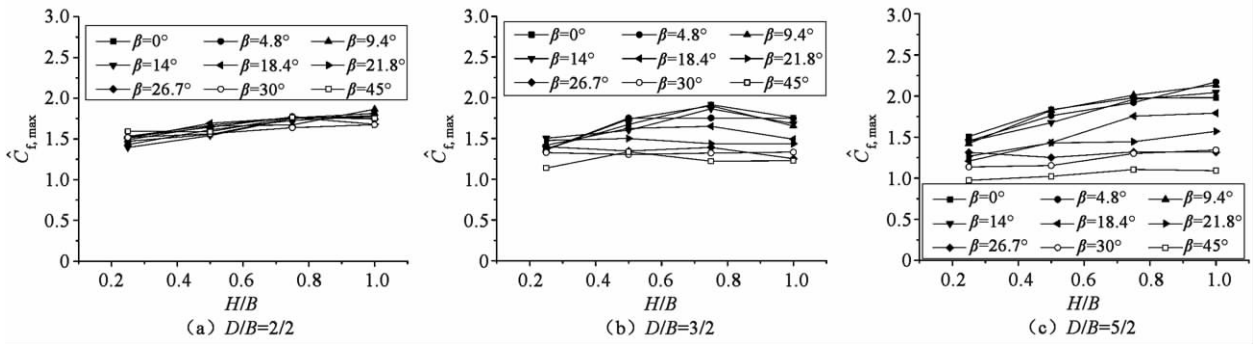


图4 高宽比对最不利屋盖升力系数的影响

Fig. 4 Most unfavorable uplift force coefficients on roofs for different H/B

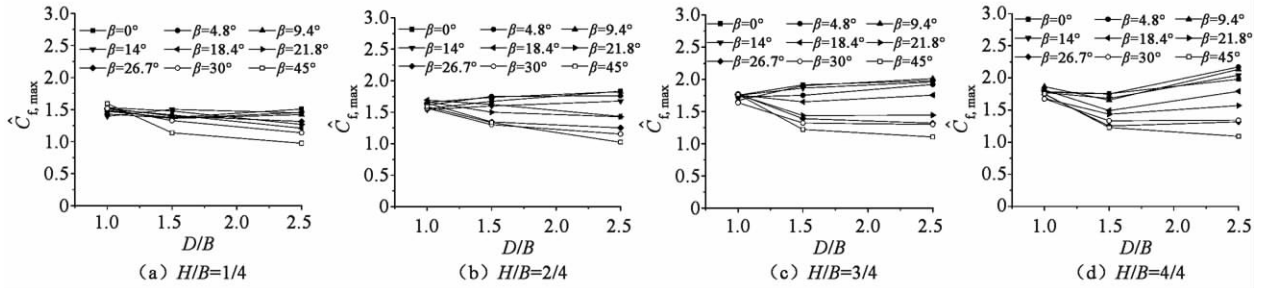


图5 厚宽比对最不利屋盖升力系数的影响

Fig. 5 Most unfavorable uplift force coefficients on roofs for different D/B

大到一定值后再随其增大而减小,但减小的幅度非常有限。在厚宽比 $D/B = 5/2$ 时,最不利屋盖升力系数基本上都随高宽比的增大而增大,但不同屋盖坡角对具体的值影响较大。总体来看,随高宽比的增大,最不利屋盖升力系数呈增大的趋势。

(3) 厚宽比 D/B 的影响

图5给出了最不利屋盖升力系数随厚宽比变化的情况。最不利屋盖升力系数随厚宽比的变化规律受屋盖坡角的影响较大。由图中的变化情况,可以将屋盖坡角分成三个范围来阐述其变化规律。当屋盖坡角 $\beta \leq 14^\circ$ 时,最不利屋盖升力系数随厚宽比的变化规律较为一致,随着厚宽比的增大其值基本不变;当屋盖坡角 $18.4^\circ \leq \beta < 45^\circ$ 且高宽比较小,最不利屋盖升力系数随厚宽比的增大而减小,但在高宽比较大时则随着高宽比的增大而先减小后增大;当屋盖坡角 $\beta = 45^\circ$ 时,最不利屋盖升力系数则始终随厚宽比的增大而减小。另外,从总体来看,高宽比较小时,不同屋盖坡角下,最不利屋盖升力系数较接近,而随着高宽比的增大,不同屋盖坡角下的最不利屋盖升力系数则趋向离散,且离散的程度随高宽比的增大而增大。但是上述情况在高宽比 $H/B = 1/4$ 例外,此时,最不利屋盖升力系数基本一致,且在总体上随高宽比的增大而增大。

(4) 拟合公式

为了便于工程应用,基于上述试验数据处理的结果,利用多参数的最小二乘法,拟合得到如下最不

利屋盖升力系数的函数表达式:

$$\hat{C}_{f, \max} = 1.6 - \frac{2\gamma_{HB}}{11} - \frac{\gamma_{DB}}{6} + \frac{\gamma_{DB}\gamma_{HB}}{2} + \frac{\beta\gamma_{HB}}{65} - \frac{\beta\gamma_{HB}\gamma_{DB}}{53} \quad (5)$$

式中:高宽比 $\gamma_{HB} = H/B$;厚宽比 $\gamma_{DB} = D/B$; β 为屋盖坡角。

图6对拟合公式(5)的准确性进行了分析。可以看出,试验值比较均匀地分布于代表拟合值的直线的上下两侧。拟合公式能够较好地预测试验结果。

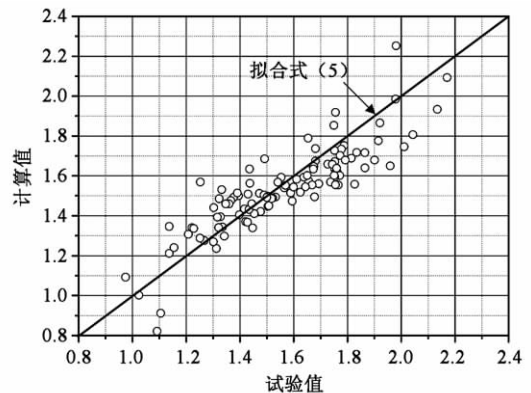


图6 拟合公式(5)的误差分析

Fig. 6 Error analysis for eq. (5)

为了能更好地量化分析拟合式的误差,定义误差率如下:

$$\text{误差率} = \frac{\text{拟合值} - \text{试验值}}{\text{试验值}} \quad (6)$$

利用上面给出的试验结果计算表明,公式(5)的

误差率的平均值为 1.09% 标准差为 8.16%。

公式(5)适用于屋盖坡角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间、高宽比在 0.25 ~ 1.00 之间、厚宽比在 1.00 ~ 2.50 之间的双坡低矮建筑最不利屋盖升力系数的计算。

4 结论

本文对一系列低矮建筑双坡屋盖的升力系数极值进行了分析,并讨论了建筑屋盖坡角、高宽比和厚宽比对最不利屋盖升力系数的影响,得到以下结论:

(1) 相同高宽比下,厚宽比越大,屋盖最大升力系数随屋盖坡角的变化越剧烈,并且随着屋盖坡角的增大而减小;

(2) 最不利屋盖升力系数随高宽比的增大而增大,而这种增大的趋势随屋盖坡角的增大而减小;

(3) 相同厚宽比下,高宽比越小,屋盖最大升力系数越小,并且不同高宽比下的差距随着屋盖坡角的增大而减小;

(4) 拟合公式(5)能够较好地预测双坡低矮建筑的最不利屋盖升力系数,误差率的平均值和标准差分别为 1.09% 和 8.16%。

致谢:本课题风洞试验是第一作者在日本留学期间在东京工艺大学的大气边界层风洞中完成的,得到日本文部科学省的 COE 研究计划的资助,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

[1] 孙炳楠,傅国宏,陈鸣,等. 94 年 17 号台风对温州

民房破坏的调查[J]. 浙江建筑,1995,12(4): 19-23. (SUN Binnan, FU Guohong, CHEN Ming, et al. Investigation on the destroy of low-rise buildings in Wen Zhou Area by typhoon No. 17 in 1994 [J]. Journal of Zhe Jiang Jian Zhu, 1995, 12 (4): 19-23. (in Chinese))

[2] Cao S Y, Ge Y J, Tamura Y. Wind damage in China caused by Typhoon Ranim [C]// Proceedings of the Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Seoul, Korea: Korea Society for Wind Engineering, 2005: 200-209.

[3] Holmes J D, Best R J. An approach to the determination of wind load effects on low-rise buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1981, 7(3): 273-287.

[4] Masters F, Gurley K, Kopp G A. Multivariate stochastic simulation of wind pressure over low-rise structures through linear model interpolation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(4-5), 226-235.

[5] 全涌,田村幸雄,松井正宏,等. 低矮建筑气动数据库介绍[C]//第七届全国风工程和工业空气动力学学术会议论文集. 北京: 中国空气动力学会, 2006: 355-360. (QUAN Yong, TAMURA Yukio, MATSUI Masahiro, et al. Introduction on an aerodynamic database for low-rise buildings [C]//Proceedings of the 7th Chinese confenfnce on Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Beijing: Chinese Society for Aerodynamics, 2006: 355-360. (in Chinese))