

均匀风场中高层建筑平均风力的阻塞效应

黄 剑, 顾 明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以联邦航空咨询委员会协调人会议(CAARC)高层建筑标准模型为例, 在同济大学 TJ-2 建筑风洞中进行了矩形单体高层建筑的阻塞效应试验研究. 对阻塞度为 4.1%、6.1%、8.4%、10.1% 的建筑刚性模型在均匀风场中进行了测压试验. 主要研究了阻塞效应对模型平均风力特性的影响. 研究表明: 在均匀来流中, 建筑各层的平均阻力系数随着阻塞度的增加而增大, 但阻力系数沿高度的分布规律没有显著变化; 顺风向平均基底弯矩系数随着阻塞度的增大显著增大. 最后, 基于试验结果提出了平均阻力系数和顺风向平均基底弯矩系数的阻塞效应修正公式.

关键词: 阻塞效应; 风洞试验; 联邦航空咨询委员会协调人会议(CAARC)标准高层模型; 平均风力

中图分类号: TU317.1 TU973.32

文献标志码: A

Experimental Investigation of Blockage Effects on Mean Wind Forces on Tall Buildings in Uniform Flow

HUANG Jian, GU Ming

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

Abstract: Blockage effects of single rectangular tall building were investigated by Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council (CAARC) Standard Tall Building Model in the TJ-2 Boundary Layer Wind Tunnel in Tongji University. The wind pressure tests of rigid models whose blockage ratios were 4.1%, 6.1%, 8.4% and 10.1% were carried out in the uniform flow. The blockage effects on mean wind force characteristics of model was emphasized. The results show that in the uniform flow, mean drag coefficient of each layer increases with the increasing of blockage ratio, while the distribution of drag coefficient along the height of buildings changes little. Along-wind mean base bending moment coefficient of buildings also increases with the increasing of

blockage ratio. Finally, new correction formula of blockage effect of mean drag coefficient and along-wind mean base bending moment coefficient were put forward based on the wind tunnel test results.

Key words: blockage effects; wind tunnel tests; Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council (CAARC) Standard Tall Building Model; mean wind forces

风洞试验是结构风工程研究的重要手段之一. 风洞通常是封闭的管道, 以洞壁为边界, 用有限的空间来模拟真实大气的无限空间必然伴随着洞壁干扰. 洞壁对气流绕流的约束称为“实体阻塞”(solid blockage), 对尾流的约束称为“尾流阻塞”(wake blockage). 上述两种洞壁干扰即为阻塞效应^[1]. 阻塞效应的存在会使某些情况下的试验结果产生畸变. 以 YF-16 飞机模型测力试验为例, 当迎角接近 90°, 模型阻塞度约为 6.6% 时, 阻力系数的修正量约为真值的 25%^[1]; 在低速风洞中, 圆平板的压力系数的修正量可高达真值的 2.6 倍以上^[2]. 虽然在航空和汽车领域, 风洞试验阻塞效应的修正发展得比较成熟^[1], 但由于外形和所处流场方面的差别, 上述方法并不能很好地用于建筑模型风洞试验的阻塞度修正.

在建筑结构模型风洞试验中, 常常认为将模型的风洞阻塞度控制在 5% 以下, 所引起的阻塞效应可以忽略不计^[3]. 但阻塞度如何影响建筑模型的流场特性和气动特性, 尚无明确结论. 至今涉及建筑结构风洞试验阻塞效应的研究较少, 且主要以二维方柱为研究对象. 一些学者^[4-8]采用在相同风洞中变化模型缩尺比的方法研究阻塞效应, 分别提出了阻力系数的修正公式. 也有少数学者对三维模型进行了研究^[3,9]. 在国内, 谢壮宁等^[10]对三种缩尺比的德州理

收稿日期: 2013-05-23

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91215302, 90715040)

第一作者: 黄 剑(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为超高层建筑结构抗风. E-mail: huangjiannt@126.com

通讯作者: 顾 明(1957—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为结构抗风、数值风洞以及结构振动控制.

E-mail: minggu@tongji.edu.cn

工大学(TTU)模型进行了测压试验对比. Wang等^[11]基于某高层建筑实际工程项目,比较了两种缩尺比(1:300、1:200)模型表面测点的平均和脉动风压系数. 关于建筑模型风洞试验阻塞效应虽然有一些研究,但并没有获得明确的认识,也未有公认的修正方法.

本文以 CAARC 标准高层建筑为试验模型,以刚性测压试验结果为基础,对模型平均层阻力系数、顺风向平均基底弯矩系数进行了考察,提出了适用于本文矩形建筑平均阻力系数和顺风向平均基底弯矩系数的风洞试验阻塞效应修正公式.

1 风洞试验概况

1.1 风场模拟

本试验在同济大学土木工程防灾国家实验室风洞试验室 TJ-2 大气边界层风洞中完成. 该风洞试验段长 15 m,宽 3 m,高 2.5 m,风速为 $0.5 \sim 60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 连续可调. 试验中均采用相同的均匀风场,控制来流风速为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 图 1 为模型位置处测得的平均风速和湍流度(量纲一)剖面. 由于风洞边界层的影响,0.3 m 以下的区域内平均风速和湍流度剖面的均匀性不如上部.

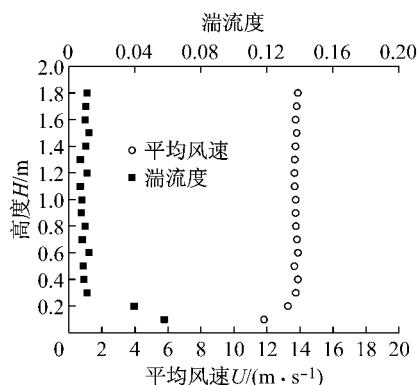


图 1 模型位置平均风速和湍流度剖面

Fig.1 Mean wind velocity and turbulence intensity profiles

1.2 模型概况

试验模型尺寸见表 1. 表中, D_x 为模型横截面宽度, D_y 为模型横截面长度, H 为模型高度. 各模型表面测点布置图如图 2 所示. 图 3 为风洞试验中基本坐标的定义. 本文仅在 0° 风向角(模型宽面迎风)的情况下进行了研究. 试验模型全部采用 5 mm 厚有机玻璃板制作,测点钻孔直径为 1.1 mm,测压管与扫描阀之间用 PVC 管连接. 各模型测压管长度均采

用 1 000 mm,以避免测压管长度不同或管道过长所带来的误差. 试验数据采用相同的管道修正函数来修正^[12].

表 1 模型尺寸表

Tab.1 Model dimensions

缩尺比	模型编号	D_x/mm	D_y/mm	H/mm	宽面迎风阻塞度/%
1:165	M1	185	277	1 108	4.1
1:135	M2	226	339	1 355	6.1
1:115	M3	265	398	1 590	8.4
1:105	M4	290	435	1 742	10.1

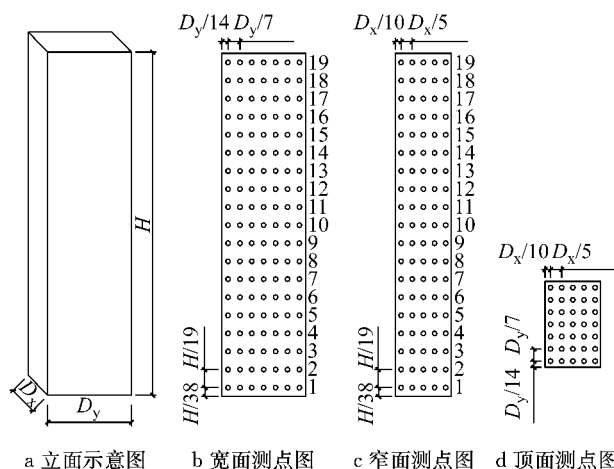


图 2 模型立面示意图及测点布置图

Fig.2 Elevational view of the model and arrangement of measuring points

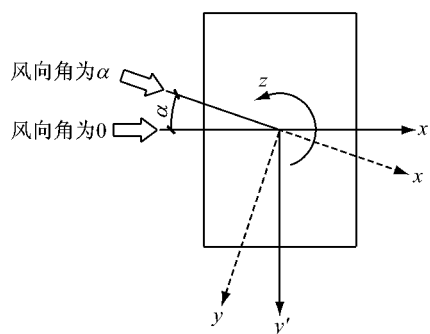


图 3 基本坐标定义

Fig.3 The basic coordinate system

2 试验数据分析

2.1 层平均阻力系数

阻力系数表示建筑顺风向受力,是建筑迎风面和背风面测点风力特性的综合反映,由建筑模型每层表面测点的风压积分得到. 定义层平均阻力系数如下:

$$\bar{C}_D(z_i) = \bar{C}_{Du}(z_i) + \bar{C}_{Dd}(z_i) \quad (1)$$

$$\bar{C}_D(z_i) = \frac{\bar{F}_D(z_i)}{\rho U_{ref}^2 A(z_i)/2} \quad (2)$$

$$\bar{C}_{Du}(z_i) = \frac{\bar{F}_{Du}(z_i)}{\rho U_{ref}^2 A(z_i)/2} \quad (3)$$

$$\bar{C}_{Dd}(z_i) = \frac{\bar{F}_{Dd}(z_i)}{\rho U_{ref}^2 A(z_i)/2} \quad (4)$$

式(1)–(4)中: \bar{C}_D 为层平均阻力系数; \bar{C}_{Du} 为迎风面层平均阻力系数; \bar{C}_{Dd} 为背风面层平均阻力系数; \bar{F}_D 、 \bar{F}_{Du} 、 \bar{F}_{Dd} 分别为层平均阻力、迎风面层平均阻力、背风面层平均阻力,由模型表面每层测点风压积分得到; ρ 为空气密度; z_i 为该层测点高度; $A(z_i)$ 为高度为 z_i 处的受风面积; U_{ref} 为模型高度处平均参考风速。

为方便分析,定义相对差值 Δ_s 如下:

$$\Delta_s = \frac{S_{Mi} - S_{M1}}{S_{M1}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, S_{Mi} 为模型 M_i 相应的平均阻力系数值, $i=1\sim 4$ 。

图4为各模型层平均阻力系数。可见,在不同阻塞度情况下,平均阻力系数沿高度的分布规律相同。各模型靠近底部和顶部位置的层阻力系数较小,在模型中部位置阻力系数随高度的增加而增大。在相同高度处的层平均阻力系数随阻塞度增加而增大。图5为各模型层平均阻力系数与M1结果的相对差值。可见,层平均阻力系数相对差值在底部 $0.5H$ 的范围内有“凸起”,主要原因是在该高度以下模型M1的测点受到边界层的影响。在其他范围内,M2的相对差值沿高度较为均匀。随着阻塞度增大, $0.5H$ 以上和 $0.5H$ 以下的相对差值增大较为显著。M2的相对差值接近7%;M3的相对差值接近15%;M4的相对差值在整个高度上都大于20%。

图6为各模型迎风面层平均阻力系数。可见,阻塞度的变化对迎风面层平均阻力系数的影响较小。M1的迎风面平均阻力系数在 $0.2H$ 以下受边界层的影响较为明显。在 $0.5H$ 以上,迎风面层平均阻力系数随阻塞度的增加稍有降低。图7为各模型迎风面层平均阻力系数与M1结果的相对差值。可见,在模型 $0.4H\sim 0.9H$ 高度范围内,层平均阻力系数的相对差值,可用确定的数值表示,且相对差值都小于10%。

图8为各模型背风面层平均阻力系数。可见,各模型背风面层平均阻力系数沿高度的变化较为一

致。阻塞度越大相同高度的背风面层阻力系数越大。图9为各模型背风面层平均阻力系数与M1结果的相对差值。可见,M2、M3的背风面阻力系数的相对差值沿高度的分布较为均匀,可用确定数值表示。M2的相对差值约为14%,M3的相对差值约为31%;M4的背风面阻力系数的相对差值沿高度的变化较大,数值都超过50%。

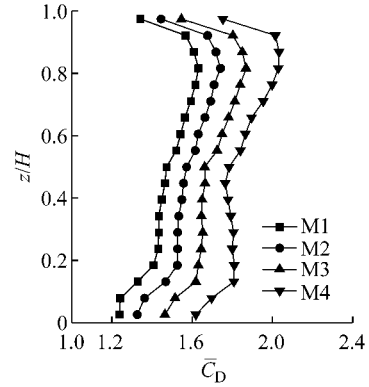


图4 各层平均阻力系数

Fig.4 Mean drag coefficients of each layer

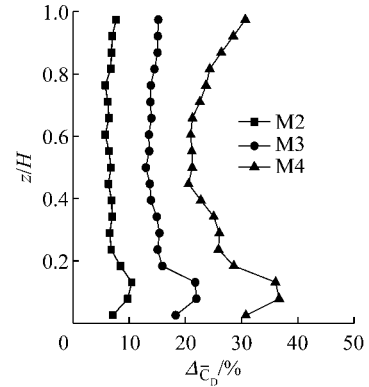


图5 各层平均阻力系数的相对差值

Fig.5 Relative difference of mean drag coefficients of each layer

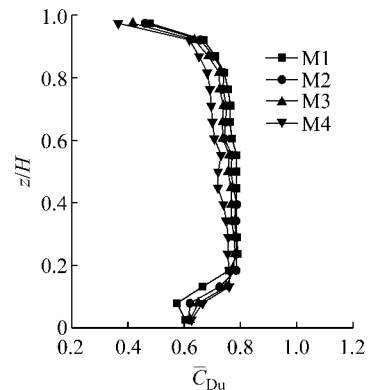


图6 各层迎风面平均阻力系数

Fig.6 Windward side mean drag coefficients of each layer

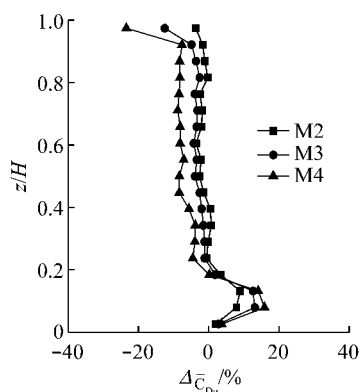


图 7 各层迎风面平均阻力系数的相对差值

Fig. 7 Relative difference of windward side mean drag coefficients of each layer

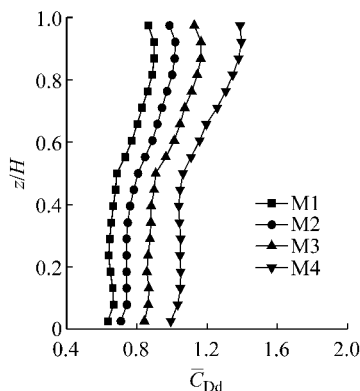


图 8 各层背风面平均阻力系数

Fig. 8 Leeward side mean drag coefficients of each layer

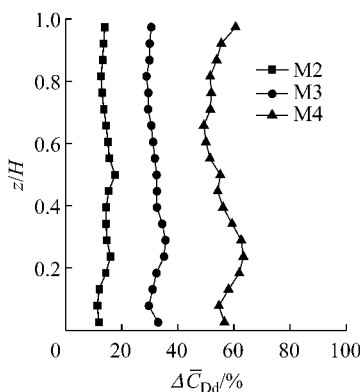


图 9 各层背风面平均阻力系数的相对差值

Fig. 9 Relative difference of leeward side mean drag coefficients of each layer

由图 4—9 可见,阻塞效应对模型层平均阻力系数的影响主要来自于背风面,而迎风面阻力系数随阻塞度的变化较小,可以忽略其影响。

2.2 顺风向平均基底弯矩系数

在刚性模型测压试验中,将建筑表面风压系数积分,可直接得到模型的基底力矩系数。定义顺风向

平均基底弯矩系数如下:

$$\bar{C}_{M_D}(z_i) = \frac{\bar{M}_D}{\rho U_{\text{ref}}^2 B H^2 / 2} \quad (6)$$

式中: \bar{M}_D 为顺风向平均基底弯矩; H 为模型高度, B 为结构迎风面投影宽度。相对差值 Δ_s 可用式(5)来计算。

图 10 为各模型顺风向平均基底弯矩系数。可见,顺风向平均基底弯矩系数随着阻塞度的增加而增大。图 11 为各模型顺风向平均基底弯矩系数与 M1 结果的相对差值。可见,当阻塞度为 6.1% 时,顺风向平均基底弯矩系数增大 6.7%; 当阻塞度达到 10.1% 时,顺风向平均基底弯矩系数将增大 25%, 结果将严重失真。

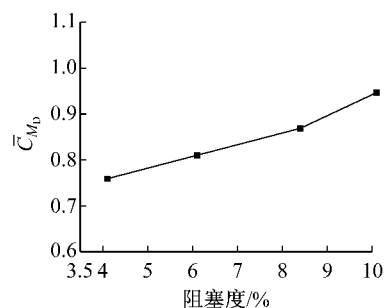


图 10 顺风向平均基底弯矩系数随阻塞度的变化

Fig. 10 Along-wind mean base bending moment versus blockage ratio

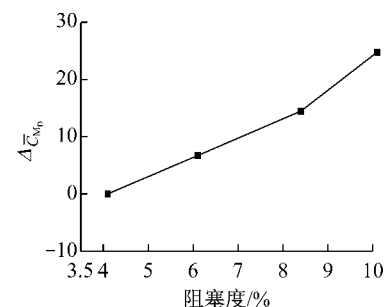


图 11 顺风向平均基底弯矩系数相对差值随阻塞度的变化

Fig. 11 Relative difference of the along-wind mean base bending moment vs. blockage ratio

2.3 阻塞效应修正方法

本次试验的平均来流风速为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 模型的雷诺数范围为 $\text{Re} = 1.46 \times 10^5 \sim 4.17 \times 10^5$, 属于同一量级。并且对于方柱这样的带有尖角的钝体, 分离点固定在迎风前缘的角部位置。由此认为, 雷诺数的影响可忽略。在风场方面, 本次试验采用均匀流场, 排除了来流给试验结果带来的差别。所以, 阻塞效应是本文高层建筑模型平均层阻力系数和顺风向平均基底弯矩系数差别的主要原因。

(1) 前人的修正方法

对于类似于本文模型的钝体结构的风洞试验阻塞度修正方法主要有两种: Maskell 法^[13] 和 Peitzman 法^[14].

Maskell 法是根据动量定理辅以经验关系导出的修正公式:

$$q = q_u \left(1 + \frac{5}{2} \frac{S}{A} C_{x_u}\right) \quad (7)$$

式中: q 为经过阻塞效应修正后的模型处的动压力; q_u 为风洞空载时流经模型处的动压力; S/A 为阻塞

比; C_{x_u} 为试验测得的模型阻力系数.

Peitzman 法是根据质量守恒定理推导, 并进行简化的修正公式:

$$q = q_u \frac{1}{(1 - S/A)^2} \quad (8)$$

图 12 为模型层阻力系数的修正结果. 可以看到, 经过 Maskell 法修正后的结果更为接近, 但总体来看, 两种方法对平均阻力系数的修正结果并不理想, 需要发展更好的修正方法.

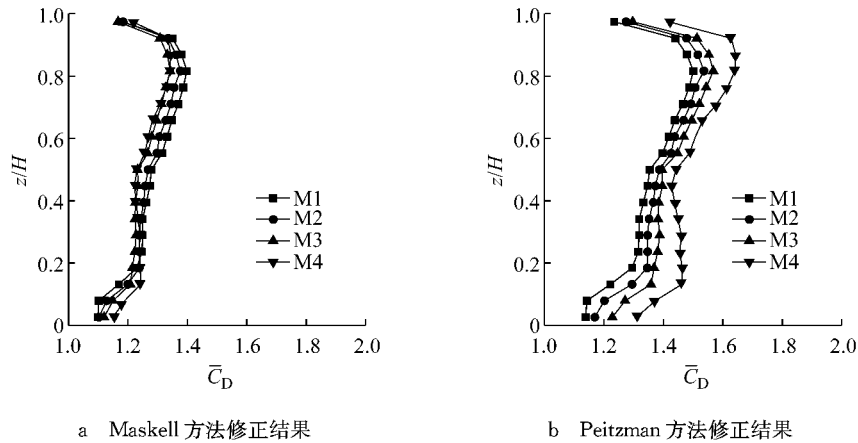


图 12 0° 风向角时层阻力系数的修正结果

Fig.12 Correction of mean drag coefficients of each layer in 0° azimuth

(2) 本文提出的修正方法

由于 Peitzman 方法形式简单, 原理易于理解, 将其作进一步修正, 提出适用于平均阻力系数的阻塞效应修正公式. Peitzman 法根据质量守恒定理推导, 假定单位时间内通过管道任意截面的流体的流量相同. 在风洞试验中, 模型位置截面的风速会大于来流风速. 但该方法明显低估了本次试验中的阻塞效应. 鉴于此, 在 Peitzman 法中引入阻塞效应调整因子 k , 修正公式如下所示:

$$\bar{C}_D = \bar{C}_{D0} \frac{1}{(1 - kS/A)^2} \quad (9)$$

式中: \bar{C}_{D0} 为不受阻塞效应的模型平均阻力系数, 为待定参数; \bar{C}_D 为风洞试验获得的模型平均阻力系数; k 为阻塞效应调整因子, 表征阻塞效应的大小程度, 为待定参数.

使用式(10)对模型各层平均阻力系数进行最小二乘拟合, 得到相应参数. 拟合结果如图 13 所示, 将参数 k 沿高度的变化情况示于图 14 中, 新的修正方法可表示为

$$q = q_u \frac{1}{(1 - kS/A)^2} \quad (10)$$

其中:

$$k = \begin{cases} -1.3756z/H + 2.0814 & 0 < z/H < 0.47 \\ 1.4157 & 0.47 < z/H < 0.68 \\ 1.4193z/H + 0.4469 & 0.68 < z/H < 1 \end{cases} \quad (11)$$

由图 14 和式(11)可知, 在约为 $0.5H \sim 0.7H$ 高度处, 阻塞效应修正因子为一定值, 随着高度的增加或减小, 修正因子增大. 这表明, 矩形单体高层建筑底部和顶部处的风洞试验阻塞效应最为明显.

采用式(10)~(11)对各模型层平均风压系数进行修正, 修正结果示于图 15 中, 可见修正结果较为满意.

对模型顺风向平均基底弯矩的修正可由各层平均阻力系数修正公式获得. 具体思路如下: 基底弯矩是层阻力系数在高度方向上的一阶矩, 所以在图 14 中, 对参数 k 求一阶矩, 得到 $z/H = 0.4842$, 相应的 $k = 1.4157$. 利用式(10)对各模型顺风向平均基底弯矩系数修正, 结果如图 16 所示. 图中, 虚线结果是不同阻塞率的模型顺风向平均基底弯矩; 实线是相应的修正结果. 可见, 修正后的顺风向平均基底弯矩系数基本不随阻塞率的增大而变化, 表明修正结果较为满意.

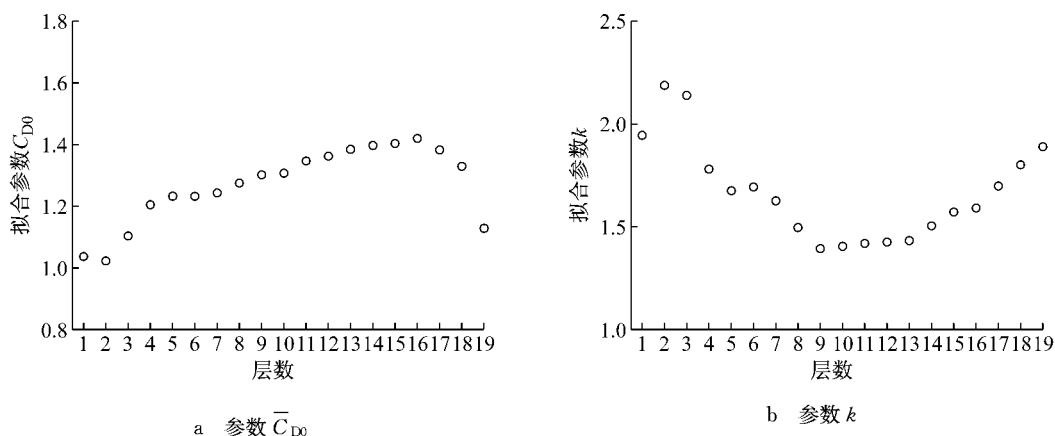


图 13 模型层平均阻力系数的阻塞度修正公式参数拟合

Fig. 13 Parameter fitting of blockage effect correction formula of mean drag coefficients of each layer

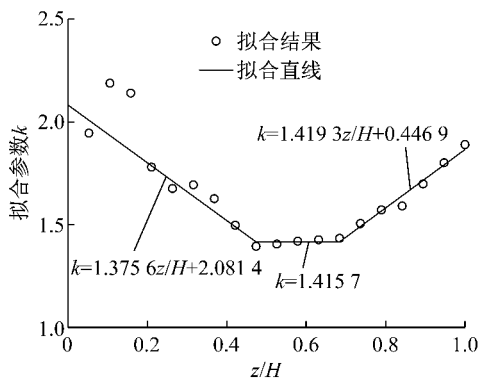
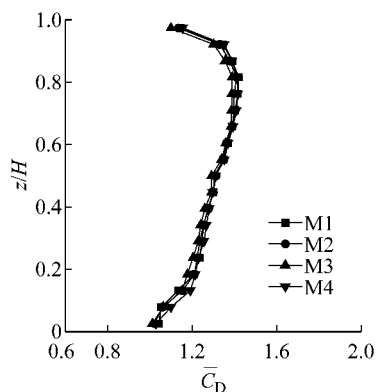
图 14 参数 k 的公式拟合Fig. 14 Formula fitting of parameter k 

图 15 各层平均阻力系数的改进方法修正结果

Fig. 15 Improved correction formula results of mean drag coefficients of each layer

3 结论

本文研究了均匀风场中矩形单体高层建筑模型风洞试验阻塞效应对层平均阻力系数、顺风向平均基底弯矩系数的影响,得到如下结论:

(1) 对于矩形单体高层建筑而言,阻塞效应不会

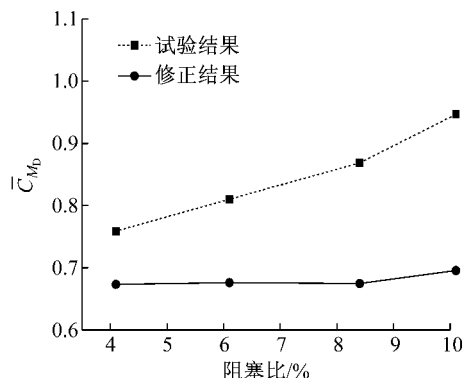


图 16 顺风向平均基底弯矩系数的改进方法修正结果

Fig. 16 Improved correction formula results of the along-wind mean base bending moment coefficients

显著影响平均阻力系数沿高度的分布规律,但数值会随着阻塞度的增加显著增大;

(2) 阻塞度越大,模型层平均阻力系数越大,这主要由背风面阻力系数的变化引起;

(3) 阻塞度越大,模型顺风向平均基底弯矩系数越大;

(3) 依据现有试验数据,提出了适用于矩形单体高层建筑平均阻力系数和顺风向平均基底弯矩系数的阻塞效应修正公式,并且修正结果较为满意。

参考文献:

- [1] 程厚梅. 风洞实验干扰与修正[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
CHENG Houmei. Wind tunnel experiment interference and correction [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.
- [2] 恽起麟. 风洞实验数据的误差与修正[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
YUN Qilin. Wind tunnel experimental data error and correction [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996.

(下转第 879 页)