

# 高层建筑顶部围挡结构风荷载试验研究\*

马文勇<sup>1,2</sup>, 黄铮汉<sup>2</sup>, 郑德乾<sup>3</sup>, 张正维<sup>4</sup>

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室 石家庄, 050043)

(2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心 石家庄, 050043)

(3. 河南工业大学土木工程学院 郑州, 450001) (4. 奥雅纳工程咨询(上海)有限公司 上海, 200031)

**摘要** 由于外观和功能需求,超高层建筑可能会建造比较高的顶部围挡,因其位于结构顶部,不同的顶部围挡高度可能会对高层建筑顶面局部范围的风荷载,以及对围挡本身的风荷载产生影响,而目前尚没有统一的风荷载取值依据。针对此问题,以方形断面超高层建筑为对象,采用刚性模型测压风洞试验方法,研究了建筑顶部无、有建造围挡及围挡高度,对建筑的顶面、外表面局部区域以及顶部围挡风荷载的影响。结果表明,超高层建筑顶部围挡及其高度对建筑顶面风压分布的影响最显著,需要在结构抗风中予以重视。基于风洞试验结果,通过考虑顶部围挡高度影响范围内风压的高斯、非高斯分布,给出了不同高度顶部围挡下的建筑顶面、外表面以及顶部围挡的风荷载取值建议,可为该类结构的抗风设计提供参考。

**关键词** 超高层建筑;围挡;风洞试验;风压分布;体型系数

**中图分类号** TU973+.213

## 引言

随着现代社会人口的密集以及城市化进程的加快,超高层建筑呈现越来越多、越来越高的发展趋势<sup>[1]</sup>。超高层建筑结构频率较低,风荷载对其影响很大<sup>[2]</sup>。准确估计超高层建筑的风荷载一直都是结构抗风研究的重点问题之一,目前一般可通过风洞试验与随机振动相结合的方法,实现大多数超高层建筑风荷载及风致响应的较准确估计。

由于建筑物本身形状的改变又会影响气体的流动,从而改变作用在建筑物上的风荷载,因此通过外形的优化来减小高层建筑的风荷载也是一个非常重要的研究方向。文献[3-5]研究发现了特定形状的凹角可以减小基底的气动力。Kim等<sup>[6]</sup>研究了截面形状多边形的边数对超高层建筑的影响,并指出截面形状为三角形时位移最大。李波等<sup>[7-8]</sup>对锥形建筑物风荷载进行了一定的研究,发现超高层建筑锥率变化对顺风向阻力及扭矩影响较小。除了整体形状的改变外,还有一些超高层建筑会在中间部分开洞<sup>[9]</sup>,或者本身采用不规则的形状<sup>[10-12]</sup>。这些因素都会对作用在建筑物上的风荷载有较大的影响。此外,顶部形状的改变也是影响风荷载的一大因素,刘慕广等<sup>[13]</sup>对建筑顶部横梁的风效应进行了研究,指出横梁下侧面分离区的

峰值风压系数明显高于其它部位的风压系数。在实际工程中,部分建筑物上会修建不同形状的塔冠<sup>[14-16]</sup>,这些塔冠对于作用在建筑物上的风荷载以及基底弯矩的影响也是结构设计时需要考虑的一个因素。由于外观和功能需求,很多高层建筑顶部通常设有较高的顶部围挡,其风荷载受建筑顶部三维绕流的影响比较复杂,关于此类顶部围挡上的风荷载及其对建筑物整体风荷载的影响问题,目前还没有成熟的研究成果供其抗风设计参考,因此成为此类结构抗风设计中的一个较大的风荷载不确定性区域。

笔者采用刚性模型测压风洞试验方法,对具有不同高度顶部围挡的方形断面高层建筑进行研究,探讨顶部围挡高度对结构整体风荷载的影响,以及顶部围挡高度范围内风荷载的分布规律,从而为此类高层建筑整体风荷载取值及顶部围挡部分风荷载取值提供依据。

## 1 风洞试验概况

### 1.1 试验设备

试验在石家庄铁道大学的STDU-1风洞试验室低速试验段进行,该试验段截面尺寸为4.4 m×3 m,

\* 国家自然科学基金资助项目(51408196);河北省教育厅重点资助项目(ZD2018063);河南工业大学青年骨干教师培育计划资助项目

收稿日期:2020-03-26;修回日期:2020-06-18

风速最大可达 30.0 m/s。试验采用刚性模型测压试验。压力数据采集系统采用美国 PSI 公司的 DTC 系列微型 ESP 压力传感器和 DTC Initium 采集系统。

试验时采用的风场为 B 类风场<sup>[17]</sup>, 模型顶部高度 (60 cm) 处的试验来流风速为 10 m/s。采样频率为 330 Hz, 采样时间为 30 s。图 1 为试验模拟的 B 类风场平均风剖面及湍流度剖面。

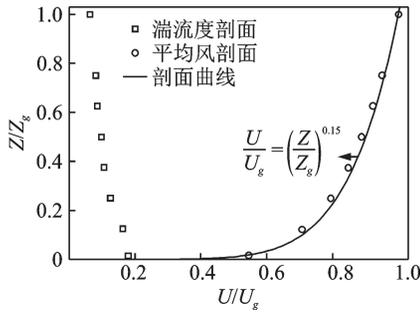


图 1 试验平均风及湍流度剖面

Fig.1 Experiment wind velocity and trubulence intensity profiles

1.2 试验模型及工况

试验模型采用 ABS 板制作, 模型尺寸为 100 mm × 100 mm × 600 mm, 模型缩尺比为 1: 500, 对应实际高度 300 m 的超高层建筑。分别考虑了 5 种顶部围挡高度, 即  $H_p$  为 0, 20, 40, 60 和 80 mm, 对应实际的无顶部围挡、10, 20, 30 和 40 m 高的顶部围挡。采用刚性模型测压试验, 模型测点布置如图 2 所示。

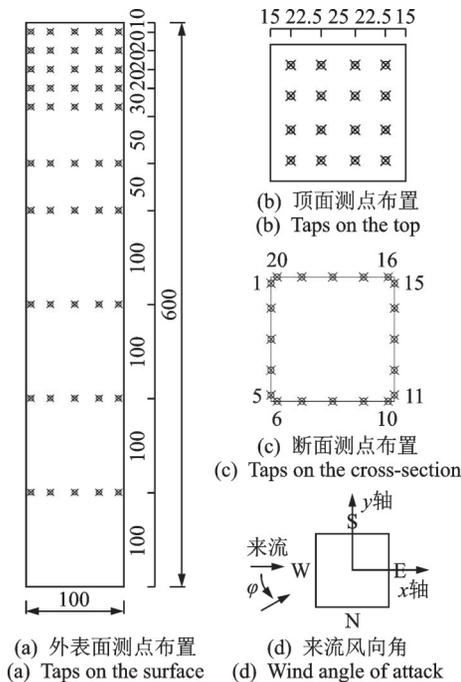


图 2 模型测点布置示意图(单位:mm)

Fig.2 Arrangement of pressure taps on the model (unit: mm)

沿模型高度共布置 10 圈测压点, 每圈 20 个测点, 当有顶部围挡存在时, 在顶部围挡范围内的内外两侧均布置测点, 内、外表面测点位置相互对应。在建筑顶面布置 4 排测点, 每排测点 4 个, 共 16 个测点。模型 4 个立面按照逆时针分别标记为 W, N, E 和 S, 如图 2(d) 所示。来流风向与 W 面垂直时为 0° 风向, 风向角  $\varphi$  沿着逆时针方向从 0° 增大到 90°, 间隔为 5°。

1.3 参数定义

风压系数定义为

$$C_{pi}(t) = \frac{P_i(t) - P_0}{P_r} = \frac{P_i(t) - P_0}{0.5\rho U_r^2} \quad (1)$$

其中:  $C_{pi}(t)$  为测点  $i$  处  $t$  时刻的风压系数;  $P_i(t)$  为测点  $i$  处  $t$  时刻测点的表面风压;  $P_0$  与  $P_r$  为参考高度 (建筑顶部高度) 处皮托管测得的静压和参考风压;  $\rho$  为空气密度;  $U_r$  为参考风速, 此处取建筑物顶部高度处的来流风速。

采用  $C_{pmean}$  和  $C_{prms}$  表示风压系数的平均值和标准差, 称为平均风压系数和脉动风压系数。

风荷载体型系数定义为

$$C_{ps}(t) = \frac{P_i(t) - P_0}{P_r \left(\frac{Z_i}{H}\right)^{2\alpha}} \quad (2)$$

其中:  $Z_i$  为测点所在高度;  $H$  为建筑物高度, 此处取 300 m;  $\alpha$  的数值由风场类型决定, 此处取 0.15。

净体型系数计算公式与极值体型系数计算公式分别为

$$C_{psn}(t) = \frac{P_i(t) - P_{in}(t)}{P_r \left(\frac{Z_i}{H}\right)^{2\alpha}} \quad (3)$$

$$C_{psu} = C_{psmean} + gC_{psrms} \quad (4)$$

其中:  $C_{psn}(t)$ ,  $C_{psu}$  分别为测点  $i$  处  $t$  时刻的净体型系数与极值体型系数;  $P_{in}(t)$  为测点  $i$  处相对应的内表面测点在  $t$  时刻的表面风压;  $C_{psmean}$  与  $C_{psrms}$  分别为体型系数的平均值与标准差;  $g$  为峰值因子, 此处取 3.5。

2 顶部围挡对建筑局部风压影响

由于笔者研究的顶部围挡最高为 40 m, 因此本节主要讨论顶部 50 m 范围内局部风压的分布以及受顶部围挡的影响规律。本节选取  $\varphi=0^\circ$  以及  $\varphi=45^\circ$  两种典型工况, 分析局部风压的分布规律。

2.1 顶部围挡对外表面风压的影响

图 3 为 0° 和 45° 风向角下, 建筑外表面 250~

300 m高度范围内的局部风压系数分布图,从左向右分别为W,N,E和S面。

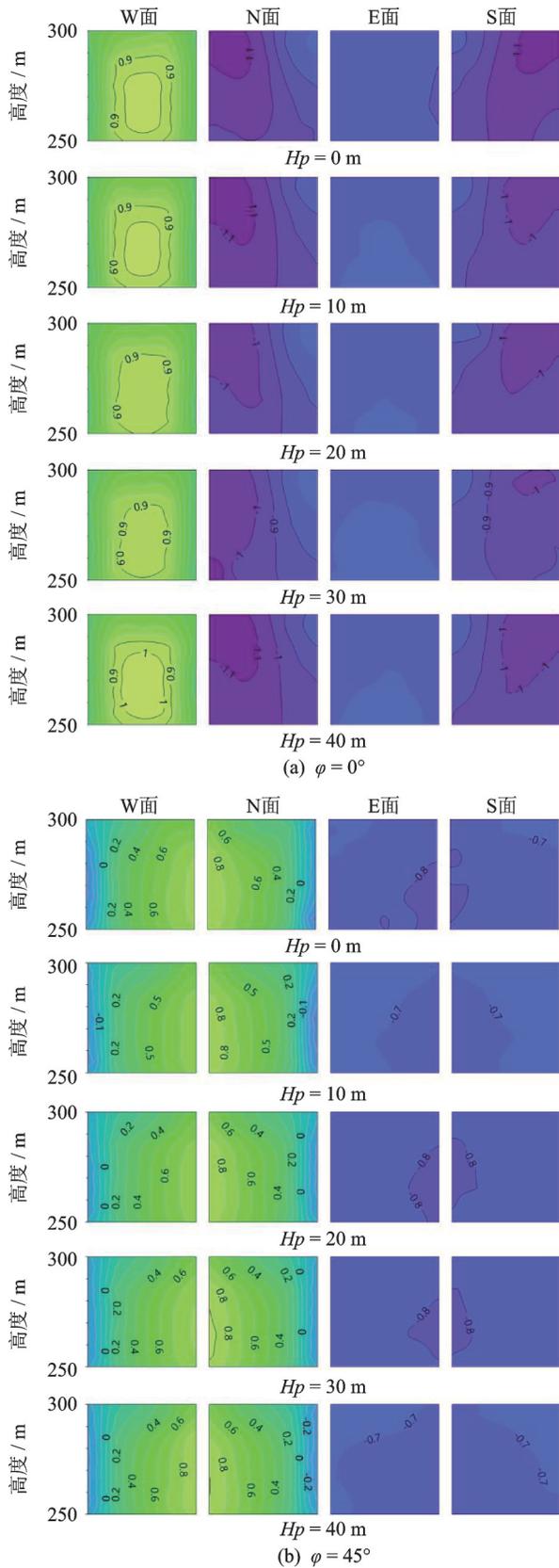


图3 典型风向角下建筑外表面局部风压系数分布  
Fig.3 Local wind pressure coefficient distribution on the outer faces of the building under typical wind angle of attack

由图3(a)可见,在0°风向角的情况下,建筑迎风面(W面)的正压、背风面(E面)的负压基本不受顶部围挡高度的影响。而在建筑的侧面(N,S面),顶部围挡高度的变化对其风压分布产生了一定的影响,这主要是由于顶部围挡对顶部分离状态的影响所致。具体来说,在不同顶部围挡高度下,建筑侧面边缘位置均出现了负压峰值。其中,围挡高度为20和30 m时的负压峰值略低于其他情况,这是由于顶部围挡高度的变化减弱了该位置处因气流分离而产生的漩涡脱落强度所致。图3(b)表明,45°风向角时,顶部围挡高度的变化建筑外表面的风压分布也几乎无影响,只是E和S面的负压峰值在围挡高度为10和40 m时略有减小。

可见,顶部围挡高度的变化对建筑物外表面的整体风压基本没有影响,仅稍微影响了负压峰值大小。

### 2.2 顶部围挡对内表面风压的影响

上面分析表明,顶部围挡的出现改变了建筑顶部的气流流动状态,对外表面风压产生了一定影响,同时也将会对建筑物顶面及围挡内表面风压产生影响。图4为0°和45°风向角下建筑物顶面及围挡内表面的风压系数分布,图中左、右侧分别为0°和45°风向角结果。

对于建筑顶面来说,当无顶部围挡时(图4(a)),建筑顶部由于处于流动分离区而表现为负风压,在0°和45°风向角时分别受流动分离产生的柱状涡、三角翼涡的影响,在建筑顶部迎风前缘分别形成了条带形、对称三角形的负压峰值区。当存在顶部围挡时(图4(b,c,d,e)),建筑顶部因围挡的存在改变了其周围流场而使得风压分布发生了显著变化,具体表现如下。

1) 0°风向角情况下,建筑顶部的负压峰值移动至顶部中心区域且呈现椭圆状分布,负压峰值均明显低于无顶部围挡的情况,说明顶部围挡的存在使得柱状涡从顶面的前半部分移动到了中间部分,漩涡强度呈现中间大、两边小的趋势;随着围挡高度的增加,建筑顶部风压分布渐趋均匀,说明随着顶部围挡高度的增加,气流在建筑物顶面的流动对顶面风压的影响逐渐减小。

2) 45°风向角情况下,负压峰值也明显低于无顶部围挡的情况,同时W和N面附近的三角负压峰值区域基本消失,这是由于顶部围挡的存在导致三角翼分离涡基本消失;此外,建筑顶面的负压沿流向对角线逐渐降低,在下游角落部位甚至出现了一小

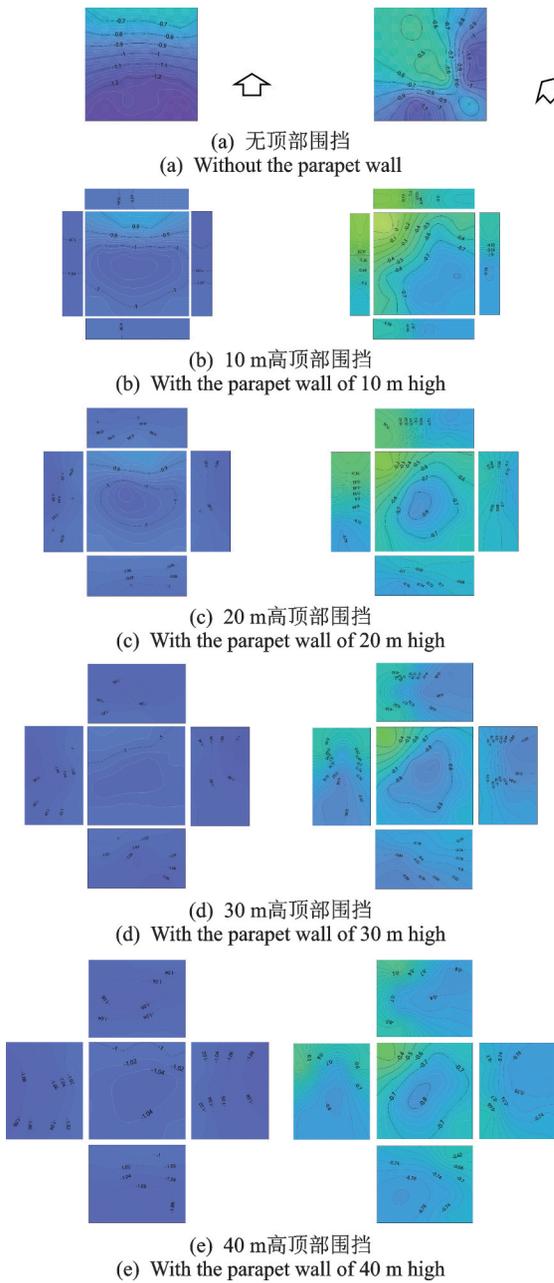


图 4 典型风向角下建筑顶部及围挡内表面风压系数分布  
Fig.4 Wind pressure coefficient distribution on the top surface of the building and the inner surface of the parapet under typical wind angle of attack

块正压区域。

对于顶部围挡内表面来说,在 0°和 45°风向角下,内表面均为负压,0°风向角时负压值相对较大但压力梯度相对较小,而 45°风向角时负压值相对较小但压力梯度相对较大;随着围挡高度的增加,两个风向角下的负压值的变化均不甚明显。

总体而言,有、无顶部围挡对建筑顶面的风压影响较大,有顶部围挡的情况会降低负压峰值并改变压力分布的规律;顶部围挡高度的增加会缩小顶面风压的变化范围,使顶面风压更为均匀。顶部围挡

内表面风压受围挡高度的影响相对较小。

### 3 局部风荷载取值建议

上述研究表明,顶部围挡对整体风荷载没有影响,但对外表面局部(250~300 m)、顶部以及顶部围挡内表面有着一定的影响。结构抗风中,通常假设结构表面风压服从高斯分布,并据此得到结构设计时的极值体型系数,但实际并非所有区域的风压都服从高斯分布。因此,在进行极值体型系数的计算时,需要将高斯风压与非高斯风压进行区分处理。

#### 3.1 非高斯风压与高斯风压的区分标准

风压脉动的非高斯特性,可采用风压时程的 3 阶矩(偏度  $S$ )和 4 阶矩(峰度  $K$ )表征,其计算公式为

$$S = j^{-1} \sum_{i=1}^j [(C_{pi}(t) - C_{pmean}) / C_{prms}]^3 \quad (5)$$

$$K = j^{-1} \sum_{i=1}^j [(C_{pi}(t) - C_{pmean}) / C_{prms}]^4 \quad (6)$$

其中: $j$ 为风压时程的采样点数,此处取 9 900。

考虑到风场的随机特性以及测量中存在的误差,将  $|S| > 0.5$  且  $|K| > 3.5$  作为风压非高斯分布的标准,并参照该标准,绘制了 0°风向角下不同顶部围挡高度下建筑外表面、顶面与围挡内表面的高斯区与非高斯区,如图 5 和图 6 所示,图中阴影部分为非高斯区。由图可见,顶部围挡高度对建筑外表面、顶面以及围挡内表面的非高斯区风压分布区域均有较显著的影响,若不考虑该影响,将影响围护结构极值风压的估计。

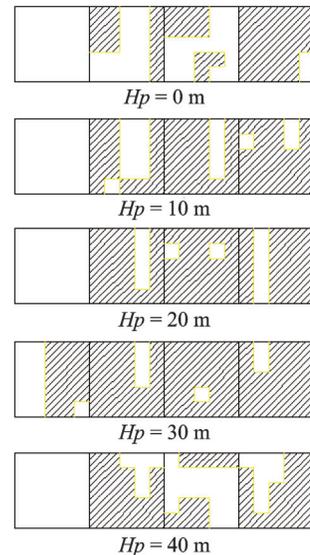


图 5 外表面非高斯风压分布区域  
Fig.5 Sketches of the non-Gaussian wind pressure distribution zone on the outer face

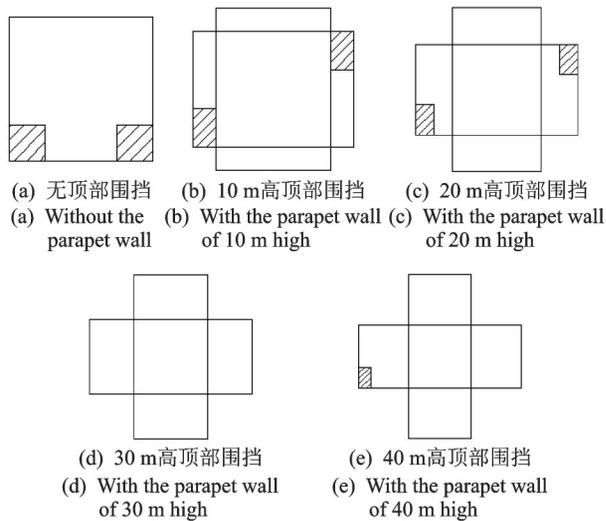


图 6 顶面及内表面非高斯风压分布区域  
Fig.6 Sketches of the non-Gaussian wind pressure distribution zone on the top and inner faces

### 3.2 局部体型系数取值建议

对于非高斯区域的体型系数的极值,笔者使用极值分布理论对其进行计算<sup>[18]</sup>。给出了不同顶部围挡高度下围挡内表面、高层建筑顶面和外表面局部区域(250~300 m)的风荷载体型系数,以及顶部围挡的净体型系数取值建议,分别如表 1~3 所示。其中:表 1 为建筑顶面可能取得的平均与极值体型系数的最大负值;表 2 为建筑外表面局部区域可能取得的最大正值体型系数与最大负值体型系数;表 3 为顶部围挡的净体型系数可能取得的最大正值与负值。

表 1 高层建筑顶面体型系数取值建议

**Tab.1 The suggested value of shape coefficient of the top surface**

体型系数	$H_p/m$				
	0	10	20	30	40
平均	-1.02	-1.07	-1.08	-1.11	-1.10
极值	-3.87	-3.60	-3.43	-3.26	-3.24

表 2 建筑外表面局部体型系数取值建议

**Tab.2 The suggested value of shape coefficient of the outer surface**

体型系数	$H_p/m$					
	0	10	20	30	40	
平均	最大正值	0.92	0.92	0.95	0.91	0.94
	最大负值	-1.29	-1.29	-1.27	-1.21	-1.30
极值	最大正值	2.54	2.43	2.45	2.61	2.53
	最大负值	-5.02	-6.39	-5.76	-6.49	-5.88

表 3 顶部围挡净体型系数取值建议

**Tab.3 The suggested value of net shape coefficient of parapet**

净体型系数	$H_p/m$					
	0	10	20	30	40	
平均	最大正值	-	1.89	1.89	1.93	2.07
	最大负值	-	-0.33	-0.15	-0.06	-0.01
极值	最大正值	-	3.76	3.85	4.09	4.28
	最大负值	-	-3.02	-2.64	-2.62	-2.34

## 4 结 论

1) 对于围挡附近的局部风压来说,围挡高度的变化对建筑外表面局部风压并无明显的影响,仅在某些情况下对侧风面的负压峰值有一定影响。

2) 对于建筑顶面和围挡内表面而言,顶部围挡的存在会明显改变建筑物顶面局部区域的气流状态,从而降低了建筑顶面的负压峰值及其表面的压力分布。顶部围挡高度的增加会缩小建筑顶面风压的变化范围,使顶面风压更为均匀。围挡内表面风压受围挡高度的影响相对较小。

3) 通过划分高斯、非高斯风压分布区域,给出了不同围挡高度下,高层建筑外表面局部区域和建筑顶面,以及围挡表面的风荷载体型系数值,可为该类结构的抗风设计提供参考。

## 参 考 文 献

[1] 丁洁民,吴宏磊,赵昕.我国高度 250 m 以上超高层建筑结构现状与分析进展[J].建筑结构学报,2014,35(3): 1-7.  
DING Jiemin, WU Honglei, ZHAO Xin. Current situation and discussion of structural design for super high-rise buildings above 250 m in China [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3): 1-7. (in Chinese)

[2] 全涌,张正维,顾明,等.矩形截面高层建筑的横风向基底弯矩系数均方根值研究[J].土木工程学报,2012,45(4): 63-70.  
QUAN Yong, ZHANG Zhengwei, GU Ming, et al. Study of the RMS values of across-wind aerodynamic base moment coefficients of high-rise buildings with square or rectangular sections[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(4): 63-70. (in Chinese)

[3] 张正维,全涌,顾明,等.凹角对方形截面高层建筑基底气动力系数的影响研究[J].土木工程学报,2013,46(7): 58-65.  
ZHANG Zhengwei, QUAN Yong, GU Ming, et al. Effects of corner recession modification on aerodynamic coefficients of square high-rise buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 58-65. (in Chinese)

[4] 郑朝荣,张继同,张智栋.凹角与吸气控制下高层建

- 筑平均风荷载特性试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(10): 125-131.
- ZHENG Chaorong, ZHANG Jitong, ZHANG Zhi-dong. Experimental investigation on characteristics of mean wind loads of high-rise buildings controlled by corner recession and air-suction [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10): 125-131. (in Chinese)
- [5] 张正维, 全涌, 顾明, 等. 斜切角与圆角对方形截面高层建筑气动系数影响的研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 12-20.
- ZHANG Zhengwei, QUAN Yong, GU Ming, et al. Effects of corner chamfering and rounding modification on aerodynamic coefficients of square tall buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(9): 12-20. (in Chinese)
- [6] KIM Y C, BANDIE K, YOSHIDA A, et al. Response characteristics of super-tall buildings-effects of number of sides and helical angle [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 145: 252-262.
- [7] 李波, 杨庆山, 田玉基, 等. 锥形超高层建筑脉动风荷载特性[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(10): 8-16.
- LI Bo, YANG Qingshan, TIAN Yuji, et al. Characteristics of turbulent wind load of tapered super-tall building [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(10): 8-16. (in Chinese)
- [8] 李波, 杨庆山, 陈新中, 等. 锥形超高层建筑横风向风荷载模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(6): 1195-1203.
- LI Bo, YANG Qingshan, CHEN Xinzhong, et al. Mathematic model of across-wind load on tapered super-tall building [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(6): 1195-1203. (in Chinese)
- [9] 全涌, 严志威, 温川阳, 等. 开洞矩形截面超高层建筑局部风压风洞试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(4): 113-116.
- QUAN Yong, YAN Zhiwei, WEN Chuanyang, et al. Wind tunnel test study on local wind pressure of rectangular super high-rise building with openings [J]. Building Structure, 2011, 41(4): 113-116. (in Chinese)
- [10] 楼文娟, 孙炳楠, 傅国宏, 等. 复杂体形高层建筑表面风压分布的特征[J]. 建筑结构学报, 1995(6): 38-44.
- LOU Wenjuan, SUN Bingnan, FU Guohong, et al. Distribution of wind load on surface of tall buildings with complex shapes [J]. Journal of Building Structures, 1995(6): 38-44. (in Chinese)
- [11] 韩志惠, 周珣毅, 顾明. 某建筑顶部装饰幕墙结构的风荷载及风致抖振响应计算[J]. 振动与冲击, 2008, 27(5): 40-43, 172.
- HAN Zhihui, ZHOU Xuanyi, GU Ming. Computations of wind pressure and buffeting responses of a curtain wall [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(5): 40-43, 172. (in Chinese)
- [12] 李正良, 陈胜. 某超高层建筑风洞测压试验[J]. 建筑结构, 2011, 41(1): 131-134.
- LI Zhengliang, CHEN Sheng. Test study on the wind pressure distribution of a super high-rise building [J]. Building Structure, 2011, 41(1): 131-134. (in Chinese)
- [13] 刘慕广, 谢壮宁, 石碧青. 高层建筑顶部横梁的风效应[J]. 振动与冲击, 2016, 35(5): 103-107, 152.
- LIU Muguang, XIE Zhuangning, SHI Biqing. Wind effects of a horizontal beam at top of high-rise buildings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(5): 103-107, 152. (in Chinese)
- [14] 周云, 刘纯, 汪大洋. 高层建筑楼顶钢塔风振效应的参数研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 48-54.
- ZHOU Yun, LIU Chun, WANG Dayang. Parameter influences on wind-induced vibration of a high-rise building with steel tower protrusion [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 48-54. (in Chinese)
- [15] 楚晨晖, 王浩. 超高层建筑复杂塔冠结构的风压分布与等效风荷载[J]. 黑龙江科技大学学报, 2018, 28(4): 471-477.
- CHU Chenhui, WANG Hao. Wind pressure distribution and equivalent static wind loads of complex tower crown structure [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2018, 28(4): 471-477. (in Chinese)
- [16] 陈强, 陈水福. 复杂塔冠对双塔高层建筑风压特性影响的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(8): 26-35.
- CHEN Qiang, CHEN Shuifu. Test investigation on effect of complicated tower top on wind pressure characteristics of a twin-tower high-rise building [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(8): 26-35. (in Chinese)
- [17] GB 50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [18] 全涌, 顾明, 陈斌, 等. 非高斯风压的极值计算方法[J]. 力学学报, 2010, 42(3): 560-566.
- QUAN Yong, GU Ming, CHEN Bing, et al. Study on the extreme value estimating method of non-gaussian wind pressure [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42(3): 560-566. (in Chinese)



**第一作者简介:** 马文勇, 男, 1981年5月生, 博士、教授。主要研究方向为结构风荷载、风致振动与控制。曾发表《Excitation of the large-amplitude vibrations of a circular cylinder under normal wind conditions in the critical Reynolds number range》(《Journal of Fluids and Structures》2019, Vol.84)等论文。  
E-mail: ma@stdu.edu.cn

**通信作者简介:** 郑德乾, 男, 1981年12月生, 博士、副教授。主要研究方向为风工程、数值流体动力学计算。  
E-mail: deqianzheng@haut.edu.cn