

文章编号:1673-2049(2014)01-0076-07

复杂体型高层建筑表面风压分布及 风荷载特性试验

吴 雪¹, 李秋胜^{1,2}, 李 毅¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 香港城市大学 土木与建筑工程系, 香港)

摘要:以成都某复杂体型超高层建筑为研究对象,在大气边界层风洞中对其进行了单体建筑刚性模型测压试验,对模型表面风压的分布规律进行了讨论;利用随机振动理论在频域内计算了基础等效静力风荷载和结构顶部加速度响应,并将风荷载试验结果与中、日两国最新规范的计算结果进行对比分析。结果表明:复杂体型高层建筑表面风压的分布规律与常规截面高层建筑基本保持一致,但是受到建筑体型的影响,个别立面的风压分布会出现与中国规范规定值完全相反的结论;同时,在局部区域会出现比规范值偏大的结果,由风洞试验结果计算得到的顺风向基底剪力和弯矩均大于中、日两国规范的计算结果,且日本规范的计算结果要大于中国规范的计算结果。所得结论可为类似工程提供参考。

关键词:高层建筑;风洞试验;风压分布;风压系数;等效静力风荷载

中图分类号:TU973.32 **文献标志码:**A

Test on Surface Wind Pressure Distributions and Wind Load Characteristics for Complex Shape High-rise Building

WU Xue¹, LI Qiu-sheng^{1,2}, LI Yi¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. Department of Civil and Architectural Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: Based on the wind tunnel test of the rigid model of a complex shape high-rise building in Chengdu in the atmospheric boundary layer, the surface wind pressure distribution laws of model were discussed. The equivalent static wind loads and wind-induced acceleration responses of top structure were calculated based on the wind tunnel results and compared with those estimated from Chinese and Japanese building design codes by using random vibration theory calculations of the model in the frequency domain. The results show that surface wind pressure distribution characteristics of complex shape high-rise building are coincided with those of conventional cross-section high-rise building. But the individual facade and normative pressure distribution results will appear the opposite conclusions owing to building size impacting. Meanwhile, in the local area, test results will be larger than the standard value results. The downwind base shear and bending moment calculated by the wind tunnel test results are greater than that by Chinese and Japanese codes, and calculation results of Japanese code are bigger than those of Chinese code. The conclusions obtained in the paper can provide reference for structural design of similar pro-

收稿日期:2013-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51178179)

作者简介:吴 雪(1989-),女,重庆市万州人,工学硕士研究生,E-mail:wuxue0326@163.com。

jects.

Key words: high-rise building; wind tunnel test; wind pressure distribution; wind pressure coefficient; equivalent static wind load

0 引言

随着科学技术和施工工艺的不断发展,建筑材料变得越来越质轻、高强及抗震,这使得建筑物的高度越来越高。建筑物高度的增加、结构体系的改进、大量轻质材料的使用,使得高层建筑的阻尼变小,结构柔度变大,对风荷载更加敏感,这对结构风工程提出越来越高的要求^[1-2]。在高层建筑结构设计的过程中,水平荷载逐渐取代竖向荷载成为控制荷载,抗风设计成为高层建筑结构设计最重要的环节^[3-4]。

对于常规截面,如矩形、方形、正六边形等的高层建筑,在进行结构抗风设计时,可以按照《建筑结构荷载规范》(GB 50001—2012)^[5]中的相关规定对风荷载进行估算,规范中的风荷载计算理论也大多基于常规截面的竖向悬臂型结构。近年来,为了满足高层建筑立面分区不同功能,高层建筑的体型逐渐复杂化,现有规范已不能准确地指导复杂体型高层建筑风荷载的估算。相对现场实测、数值模拟等手段,风洞试验是此类高层建筑进行抗风设计的有效手段^[6-9]。

四川成都地区某复杂体型超高层建筑由 75 层高档酒店(A 塔,结构主体高度为 314 m,建筑幕墙高为 333 m)和 6 层豪华公寓(B、C 塔,结构主体高度为 228 m)组成,带有 4 层裙楼。结构体系采用“带连系桁架的型钢混凝土框架+多个剪力墙筒体”的结构体系,A 塔和 B、C 塔平面均为 L 型,B、C 塔之间采用约 30 层高的连体结构相连。本文中笔者在大气边界层风洞中对单体建筑表面风压分布特性进行了研究,并将基底剪力和弯矩的试验结果与中国、日本规范的计算结果进行了对比分析,取得了一些有意义的结论,该结论可为今后类似工程的设计和规范的修订提供理论依据。

1 风洞试验

1.1 试验概况

风洞试验是在湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室的 HD-3 大气边界层风洞实验室中进行的。试验段为 $3.0\text{ m} \times 2.5\text{ m}$,风速在 $0 \sim 20\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内可调。风洞试验模型缩尺比为 $1:400$ (图 1)。试验过程中采用二元尖塔和粗糙元来模拟大气边界



图 1 风洞试验模型

Fig. 1 Wind Tunnel Test Model

层平均风速和湍流强度分布。根据该项目所处位置的地貌特点,并结合中国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)中对地面粗糙度的分类规定,在本次试验中模拟了相应的 C 类地面粗糙度的平均风速剖面 and 湍流强度分布剖面,其中, v 为平均风速, I_u 为湍流强度。

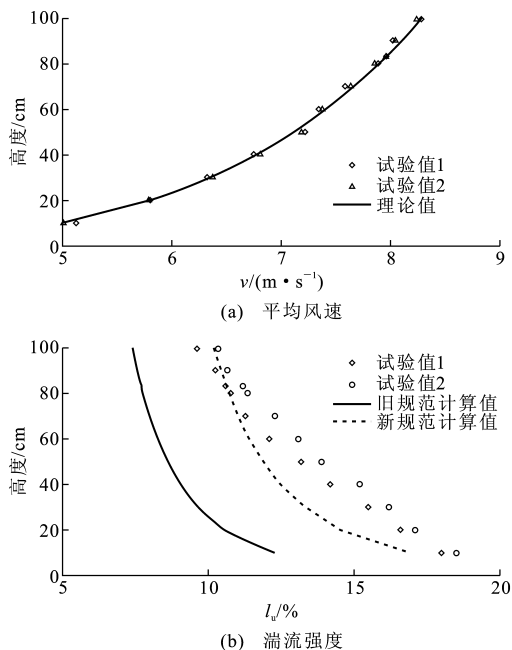


图 2 平均风速及湍流强度分布剖面

Fig. 2 Profiles of Mean Wind Speed and Turbulence Intensity Distribution

1.2 试验模型及测点布置

风洞试验模型是用丙烯腈/丁二烯/苯乙烯共聚

物板(ABS板)制成的刚体模型,几何外形与实际建筑保持相似。主体模型具有足够的强度和刚度,在试验中不会发生明显的变形和振动现象,可以保证压力测量的精度。风向角示意如图3所示。为准确测量建筑表面风压分布,在建筑物幕墙表面共布置了512个测点,沿高度方向下疏上密,在平面拐角区域测点加密,在顶部幕墙及雨篷处布置了双测点层。风向角从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 变化,风向角变化间隔为 15° 。试验过程中,不同风向角度各测点风压时程采样频率为312.5 Hz,满足文献[10]中信号采样频率的要求,采样时间为32 s,即各测点在每个风向角下记录了10 000个风压时域信号数据。试验参考点高度选为83.3 cm(与模型顶部同高),参考点控制风速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

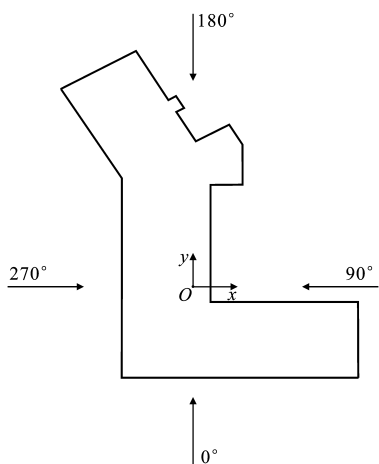


图3 风向角示意

Fig. 3 Definitions of Wind Direction

2 建筑表面风压分布

2.1 理论基础

模型试验中规定以压力向内(压)为正,向外(吸)为负^[11]。建筑表面各点的风压系数为

$$c_{pi}(t) = \frac{p_i(t) - p_\infty}{p_0 - p_\infty} \quad (1)$$

式中: $c_{pi}(t)$ 为试验模型上第*i*个测压孔所在位置的风压系数; $p_i(t)$ 为第*i*个测压孔上测得的表面风压; p_0, p_∞ 分别为某参考点处测得的平均总压和平均静压; t 为时间。

对于双侧受风的位置(内外相同位置对应布置2个测压孔),风压差系数由内、外表面对应的测压点测出的压力相减得到,即

$$\Delta c_{pi}(t) = \frac{p_i^o(t) - p_i^i(t)}{p_0 - p_\infty} \quad (2)$$

式中: $\Delta c_{pi}(t)$ 为试验模型上第*i*个测压孔所在位置

的风压差系数; $p_i^i(t), p_i^o(t)$ 分别为第*i*个测压孔所在位置内、外表面的风压。

为了简化叙述,本文中均采用压力系数 $c_{pi}(t)$ 来表示式(1),(2)两种情况。

2.2 结果分析

本文中仅给出 180° 和 135° 风向角下的单体建筑各立面平均风压系数等值线。其中, 180° 和 135° 风向角分别对应《建筑结构荷载规范》表8.3.1的第30项中所给出的L型平面体型系数的 0° 和 45° 方向(图4)。同时为便于比较,将建筑标准层立面进行编号,如图5所示。

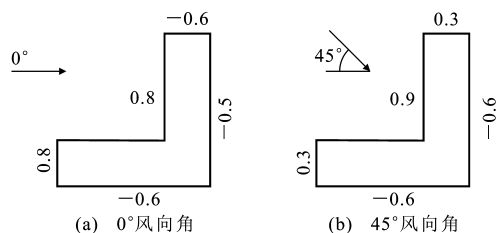


图4 L型平面体型系数

Fig. 4 L-shaped Planar Shape Factors

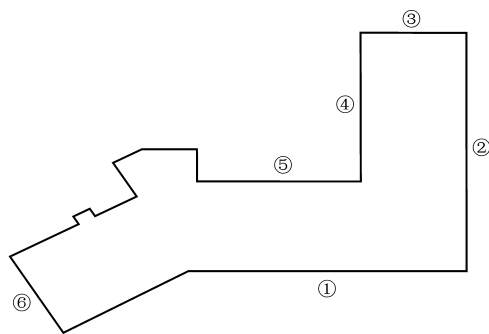


图5 建筑标准层立面编号

Fig. 5 Numbers for Facade of Building Plane

图6,7中分别给出了 180° 和 135° 风向角下各立面的平均风压系数等值线。从图6,7可以看出: 180° 风向角下,立面①的平均风压系数在 $-0.65 \sim -0.5$ 之间,与风压系数规范值 -0.6 比较接近,仅在立面拐角处受气流加速分离的影响,此时风压系数为 -0.65 ,立面②,③的平均风压系数为 $-0.55 \sim -0.35$,均比规范值略小,立面④,⑤的平均风压系数大多在 $0.4 \sim 0.6$ 之间,立面⑤在靠近凸缘部分,由于受到遮挡的影响,平均风压系数降至 0.2 左右,立面⑥的最大平均风压系数为 0.8 ,与规范值^[12]一致; 135° 风向角下,立面①,②的最大平均风压系数为 -0.6 ,与规范值一致,立面③的平均风压系数大多在 $-0.75 \sim -0.35$ 之间,在拐角气流分离处,局部可以达到 -1.0 ,该立面的试验结果与规范值

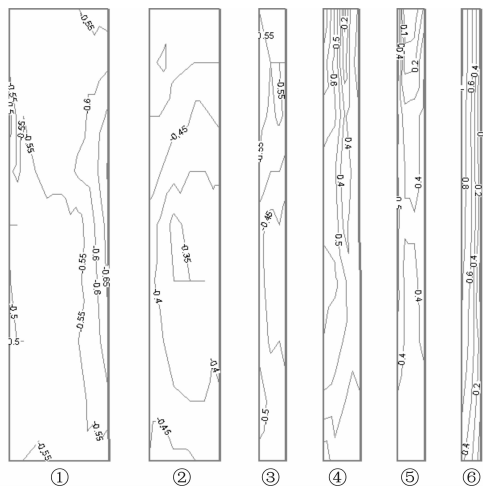


图 6 180°风向角下各立面平均风压系数等值线

Fig. 6 Contours of Mean Wind Pressure Coefficient for 180° Wind Direction

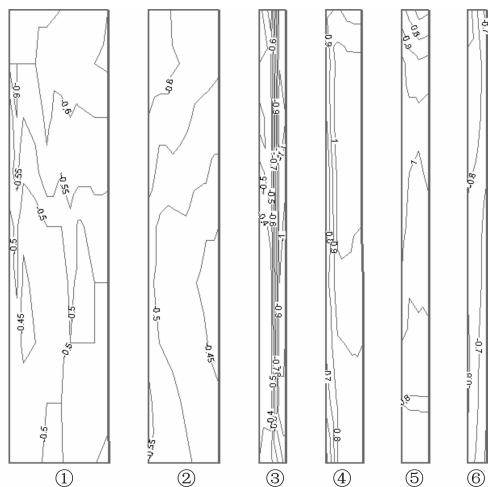


图 7 135°风向角下各立面平均风压系数等值线

Fig. 7 Contours of Mean Wind Pressure Coefficient for 135° Wind Direction

(0.3)完全不同,这点在结构设计时应引起重视,立面④、⑤的平均风压系数大多在 0.7~1.0 之间,风压系数为 1.0 发生在立面的中上部,约在立面高度的 2/3 处,比规范值 0.9 略大,立面⑥的平均风压系数为 -0.8~-0.7,但是由于受到建筑体型的影响,并不能与规范进行比较。

3 等效静力风荷载

3.1 理论基础

超高层建筑作为悬臂结构^[13-14],其风致响应的运动微分方程为

$$m(z)\frac{\partial^2 r(z,t)}{\partial t^2} + c(z)\frac{\partial r(z,t)}{\partial t} + \frac{\partial^2 [EJ(z)\frac{\partial^2 r(z,t)}{\partial z^2}]}{\partial z^2} = f(z,t) \quad (3)$$

式中: $r(z,t)$ 为位移响应,可以是 x 方向位移或 y 方向位移; $m(z)$, $c(z)$, $EJ(z)$ 分别为结构沿铅垂方向 z 单位高度的质量、阻尼系数和抗弯刚度; $f(z,t)$ 为单位高度的水平脉动风力平均基底弯矩,可以对多通道同步测出的建筑表面脉动风压分布通过表面积分获得。

对于超高层建筑的风致响应,可以只考虑第 1 阶振型的贡献,因而 $r(z,t)$ 按振型展开为

$$r(z,t) = \sum_{j=1}^{+\infty} \phi_j(z) q_j(t) \quad (4)$$

式中: $\phi_j(z)$ 为第 j 阶振型高度 z 处的坐标; $q_j(t)$ 为第 j 阶振型的广义坐标。

假定结构的振型对其质量和刚度分布正交,采用 Rayleigh 阻尼进行简化,可以得到结构第 j 阶振型的振动方程,即

$$\ddot{q}_j(t) + 2\zeta_j \omega_j \dot{q}_j(t) + \omega_j^2 q_j(t) = \frac{1}{m_j^*} p_j(t) \quad (5)$$

$$m_j^* = \int_0^H m(z) \phi_j^2(z) dz \quad (6)$$

$$p_j(t) = \int_0^H f(z,t) \phi_j(z) dz \quad (7)$$

式中: ζ_j , ω_j 分别为结构的第 j 阶阻尼比和角频率; m_j^* , $p_j(t)$ 分别为结构第 j 阶广义质量和广义力; H 为结构高度。

在超高层建筑中,其风致响应可以只考虑第 1 阶振型,故位移响应功率谱 $S_r(z,n)$ 与主坐标功率谱 $S_q(n)$ 存在如下关系

$$S_r(z,n) = \phi^2(z) S_q(n) \quad (8)$$

式中: $\phi(z)$ 为第 1 阶振型高度 z 处的坐标; n 为风压脉动频率。

根据随机振动理论,主坐标功率谱 $S_q(n)$ 可表示为

$$S_q(n) = |H(n)|^2 S_p(n) \quad (9)$$

$$|H(n)|^2 = \frac{1}{(2\pi n_0)^4 m_p^2 (1 - n^2/n_0^2)^2 + (2\xi n/n_0)^2} \quad (10)$$

式中: $S_p(n)$ 为具有广义力时间序列得到的广义力功率谱; $|H(n)|$ 为结构复频响应函数; n_0 为结构频率; m_p 为广义质量; ξ 为结构阻尼比。

于是结构的位移根方差 $\sigma_r(z)$ 为

$$\sigma_r(z) = \phi(z) \left(\int_0^{+\infty} |H(n)|^2 S_p(n) dn \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

相应的脉动风引起的各层等效静力风荷载 $P_{ef}(z)$ 为

$$P_{ef}(z) = \mu m(z) \omega_0^2 \sigma_r(z) \quad (12)$$

式中: ω_0 为结构的第 1 阶角频率; μ 为保证系数,可

按 Davenport 首次穿越理论公式 $\mu = \sqrt{2\ln(\nu T)} + \frac{0.577}{\sqrt{2\ln(\nu T)}}$ 计算^[15], ν 为结构第 1 阶自振频率, T 为脉动风时距, 常取 $T=600$ s, 一般 $\nu T=100\sim1\,000$, 则 $\mu=3.2\sim4.4$, 国外规范中通常取 $3\sim3.5$, 中国规范取 2.5 , 这是考虑到阻力系数离散性比较大。

需要注意的是, 有的文献称 $P_{ef}(z)$ 为等效风振力或惯性力, 其实 $P_{ef}(z)$ 不是一般意义上的惯性力, 按式(12)得到的 $P_{ef}(z)$ 是将背景分量及共振分量都包括在内的惯性力。

建筑结构各楼层总的等效静力风荷载 $P_{ESWL}(z)$ 等于平均风荷载 $\overline{P(z)}$ 与脉动风引起的等效静力风荷载 $P_{ef}(z)$ 之和, 即

$$P_{ESWL}(z) = \overline{P(z)} + P_{ef}(z) \quad (13)$$

因而可得到基础等效剪力 Q 和基础等效弯矩 M 分别为

$$Q = \int_0^H P_{ESWL}(z) dz \quad (14)$$

$$M = \int_0^H P_{ESWL}(z) z dz \quad (15)$$

结构楼顶高度 z 的加速度响应 $\ddot{r}(z, t)$ 的功率谱 $S_r(z, n)$ 与相应的位移响应功率谱有如下关系

$$S_r(z, n) = (2\pi n)^4 S_\tau(z, n) \quad (16)$$

因此, 加速度均方根响应 $\sigma_r(z, n)$ 可按下式计算

$$\sigma_r(z, n) = \int_0^{+\infty} [(2\pi n)^4 S_\tau(z, n) dn]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

结构各楼层顶部峰值加速度 \ddot{r}_{\max} 为

$$\ddot{r}_{\max} = \mu \sigma_r(z, n) \quad (18)$$

3.2 风洞试验结果分析

3.2.1 等效静力风荷载

根据有限元分析结果, 结构前 5 阶频率如表 1 所示。结构第 1 阶振型主要表现为 x 方向振动, 第 2 阶振型主要表现为 y 方向振动, 第 3 阶振型表现为结构的扭转。计算剪力和弯矩(扭矩)时取 100 年一遇的基本风压 0.35 kPa, 结构阻尼比取为 0.05 。

表 1 结构前 5 阶频率

Tab. 1 The First Five Natural Frequencies of Structure

阶次	1	2	3	4	5
频率/Hz	0.147 2	0.182 4	0.242 1	0.525 8	0.565 2

图 8, 9 中分别给出了 100 年重现期、阻尼比为 0.05 时的基底剪力与基底弯矩随风向角的变化。由图 8, 9 可以看出, 基底剪力与基底弯矩具有相同的分布规律。L 型建筑物的基底剪力在主轴 y 方向和 x 方向并未出现某一主轴偏大、另一主轴偏小现象, 有别于常规的矩形建筑^[16], x 方向剪力最大值

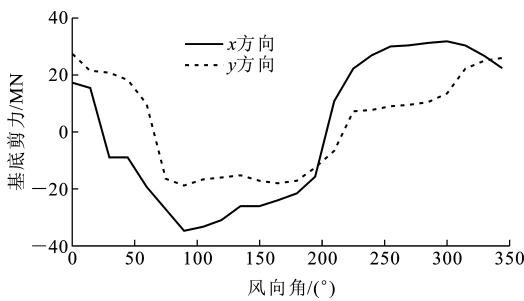


图 8 基底剪力随风向角的变化

Fig. 8 Variations of Base Shear with Wind Direction

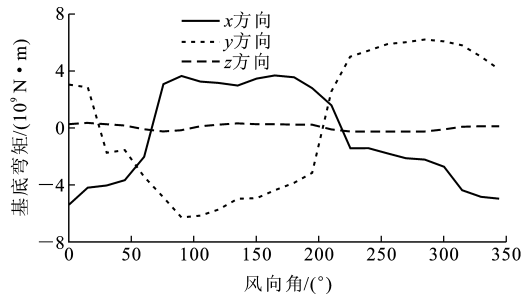


图 9 基底弯矩随风向角的变化

Fig. 9 Variations of Base Bending Moment with Wind Direction

和最小值均大于 y 方向。 x 方向弯矩和 y 方向弯矩正、负号反向, y 方向弯矩最大值和弯矩最小值大于 x 方向。 z 方向基底弯矩明显小于 x 方向和 y 方向弯矩, 在质量荷载均匀情况下, 建筑物弯扭效应不明显。

3.2.2 加速度响应

按照《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[17] 中第 3.7.6 条的规定: 高度超过 150 m 的高层建筑结构应具有良好的使用条件。为满足人体对舒适度的要求, 按 10 年一遇的风荷载取值计算的顺风向与横风向结构顶部最大加速度限值为: 办公楼、酒店不超过 $0.25\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

本文中利用由刚性模型风洞试验测得的风压力时程数据, 根据相似关系将模型的时程数据换算成与之对应的实际结构的风压力时程。通过分析计算得到结构的质量、刚度和动力特性后, 利用傅里叶变换和振型分解法分析得到结构的风压力谱密度和风压力时程。利用随机振动理论, 计算得到结构顶部的峰值加速度, 将计算结果与规范中规定的限值进行比较, 便可对该建筑结构的风致响应舒适度进行评估。

风致响应舒适度问题所涉及的结构一般有以下特点: 高度较高, 基本周期较长, 风荷载作用下结构自身的振幅较小, 且应力水平较低, 由于进行风致响

应舒适度评价时所采用的结构阻尼比要远小于结构计算时所采用的阻尼比,根据中国《高层建筑混凝土结构技术规程》^[17]中的有关规定,本文中计算所取阻尼比为 0.02。

结构顶部峰值加速度如图 10 所示。在风向角为 0°时, x 方向的最大加速度为 $0.206\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (处于横风向), y 方向的最大加速度为 $0.147\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (处于顺风向)。结构在主轴处于横风向、顺风向时,结构的横风向峰值加速度要大于顺风向峰值加速度。在 225°风向角时,结构顶部 x 方向加速度最大,为 $0.232\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,在 285°风向角时, y 方向加速度最大,为 $0.173\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,平动舒适度满足规范要求;在 0°风向角时,结构顶部绕 z 轴最大扭转加速度为 $0.005\text{ 5 rad}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

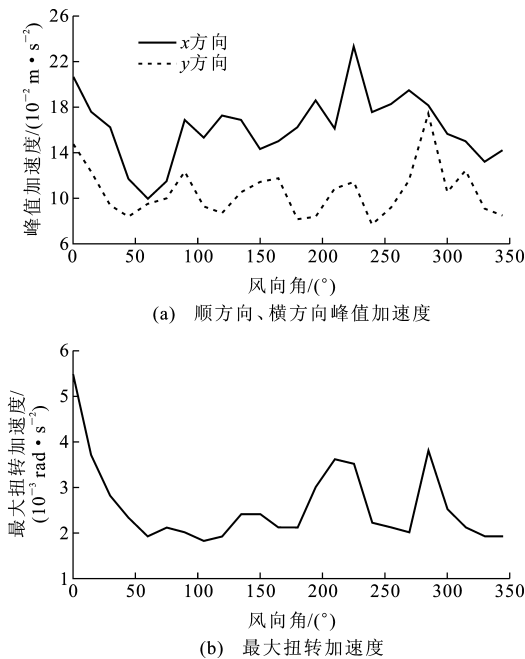


图 10 结构顶部峰值加速度随风向角的变化
Fig. 10 Variations of Peak Acceleration of Top Structures with Wind Direction

L 型建筑结构的最大加速度并未出现在结构主轴横风向和顺风向,而是偏移了一个角度,在这个角度附近的加速度也较大。超高层建筑由于自身特殊的结构特性,顶部风致振动往往比较剧烈,可能会影响人们正常居住和生活。

3.3 中国、日本规范与风洞试验结果对比

由于中国、日本规范^[18]的计算中未考虑周边地形的影响,本文中将等效静力风荷载规范计算结果与风洞试验中单体工况的计算结果进行对比,结果如表 2 所示。

在规范方法的计算时中国规范选取的粗糙度指

表 2 基底等效静力风荷载比较

Tab. 2 Comparisons of Base Equivalent Static Wind Loads

计算标准	基底剪力/MN	基底弯矩/(10⁹ N·m)
风洞试验	35.3	6.39
中国规范	31.8	5.93
日本规范	32.7	6.36

数为 0.22,对应于日本规范中的粗糙度指数为 0.2,计算结果表明,试验结果能较好地反映结构风致响应的风荷载,能够满足建筑设计的要求。

由风洞试验计算的基底剪力及弯矩大于用中、日两国规范计算的结果,且日本规范的计算结果要大于中国规范的计算结果。

中国规范与日本规范相比,其计算结果偏小,主要原因是中国规范采用的脉动风速谱与高度无关,规定风振系数随高度变化,而日本规范选取的风振系数为常数。中国规范中的风振系数实际上是惯性力风振系数,而日本规范中风振系数实际上是位移风振系数,并未考虑建筑物质量、高度等的影响,在质量和刚度变化较大时可能导致计算结果存在较大的偏差。

4 结 语

(1)对于不同方向的来流,L 型高层建筑表面风压的分布规律与常规截面高层建筑还是基本保持一致的。然而受到建筑体型的影响,在个别立面的风压分布会出现与规范结果完全相反的结论,同时,在局部区域会出现比规范值偏大的结果。

(2)建筑物基底剪力在主轴 y 方向和 x 方向并未出现某一主轴偏大、另一主轴偏小的现象,有别于常规的矩形建筑。

(3)建筑结构的最大加速度并未出现在结构主轴横风向和顺风向,可以采用减振措施来降低结构的风致响应以提高舒适度。

(4)中国规范较日本规范而言,基底剪力和弯矩的计算结果均偏小,这要引起注意。对于高层建筑,特别是复杂体型的超高层建筑,风洞试验结果具有一定的参考价值。

参考文献:

References:

[1] CERMAK J E. Wind-tunnel Development and Trends in Applications to Civil Engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003,91(3):355-370.
[2] 埃米尔·希缪,罗伯特·斯坎伦. 风对结构的作

- 用——风工程导论[M]. 刘尚培,项海帆,谢霁明,译. 上海:同济大学出版社,1992.
- SIMIU E, SCANLAN R H. Wind Effect on Structures; An Introduction to Wind Engineering [M]. Translated by LIU Shang-pei, XIANG Hai-fan, XIE Ji-ming. Shanghai: Tongji University Press, 1992.
- [3] CLUNI F, GUSELLA V, SPENCE S M J, et al. Wind Action on Regular and Irregular Tall Buildings; Higher Order Moment Statistical Analysis by HFFB and SMPSS Measurements[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99(6/7): 682-690.
- [4] 包世华,张铜生. 高层建筑结构设计和计算:上册[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- BAO Shi-hua, ZHANG Tong-sheng. Design and Analysis of Tall Building Structure; The First Volume [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [5] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
- GB 50009—2012, Load Code for the Design of Building Structures[S].
- [6] 日本风洞实验指南研究委员会. 建筑风洞实验指南[M]. 孙瑛,武岳,曹正罡,译. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- Research Committee for Building Wind Tunnel Experiment Guide of Japan. Building Wind Tunnel Experiment Guide [M]. Translated by SUN Ying, WU Yue, CAO Zheng-gang. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [7] 鞠开林,李秋胜. 复杂周边高层建筑风压分布特性试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(2): 82-86.
- JU Kai-lin, LI Qiu-sheng. Experiment on Characteristics of Mean Wind Pressure Distribution of Tall Buildings in Complex Terrain Field[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(2): 82-86.
- [8] 聂少锋,周绪红,石宇,等. 低层四坡屋面房屋风荷载的风洞试验与数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(3): 39-49.
- NIE Shao-feng, ZHOU Xu-hong, SHI Yu, et al. Wind Tunnel Test and Numerical Simulation of Wind Loads on Low-rise Hip Roof Buildings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(3): 39-49.
- [9] 汪权,王建国,张鸣祥. 高层建筑结构随机风速场的数值模拟及风振控制[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(2): 32-37.
- WANG Quan, WANG Jian-guo, ZHANG Ming-xiang. Numerical Simulation of Stochastic Wind Velocity Field and Wind Vibration Control of High-rise Building Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(2): 32-37.
- [10] LETCHFORD C W, SANDRI P, LEVITAN M L, et al. Frequency Response Requirements for Fluctuating Wind Pressure Measurements [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 40(3): 263-276.
- [11] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海:同济大学出版社,2001.
- HUANG Ben-cai. Wind-resistance Analysis Theory of Structures and Applications [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2001.
- [12] HOLMES J D. Wind Loading of Structures [M]. London: Spon Press, 2001.
- [13] SIMIU E, SCANLAN R H. Winds Effects on Structures; Fundamentals and Applications to Design [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [14] 李桂青,李秋胜. 工程结构时变可靠度理论及应用 [M]. 北京:科学出版社,2001.
- LI Gui-qing, LI Qiu-sheng. Engineering Structural Time-dependent Reliability Theory and Application [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [15] DYRBYE C, HANSEN S O. Wind Loads on Structures [M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [16] 李秋胜,李永贵,郅伦海. 典型高层住宅建筑风压分布特性的试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2011, 38(4): 14-19.
- LI Qiu-sheng, LI Yong-gui, ZHI Lun-hai. Experimental Investigation of the Wind Pressure Distributions on a Typical Tall Residential Building [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011, 38(4): 14-19.
- [17] JGJ 3—2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S].
- JGJ 3—2010, Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building [S].
- [18] AIJ-2004, Recommendations for Loads on Buildings [S].

