

# Comparative Study on the Wind Effects of a Square Super High-Rise Building Based on the Wind Tunnel Test and the Load Standard

Shengen Yuan<sup>1</sup>, Shuxi Xiao<sup>1</sup>, Zhijin Zhou<sup>1</sup>, Yonggui Li<sup>2</sup>, Yi Li<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Xiangtan City Building Design Institute, Xiangtan Hunan

<sup>2</sup>School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Email: \*engineerliyi@163.com

Received: Jan. 5<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jan. 19<sup>th</sup>, 2017; published: Jan. 23<sup>rd</sup>, 2017

---

## Abstract

Based on the wind tunnel tests of rigid model of the major tower of Beibu Gulf Center in Qinzhou, characteristics of the extreme wind pressures, overall wind loads acting on the square super high-rise building and wind-induced acceleration responses have been investigated in detail. The test results show that the extreme negative pressures are the controlled pressures for the curtain wall design; the suggested values in the Code are unsafe at the center of the building while conservative at the corner of the building. The equivalent static wind loads of the base moment are controlled by the mean wind loads. The wind induced accelerations present obvious across wind effects. The results obtained from this paper could be referred to similar projects.

## Keywords

Tall Building, Wind Tunnel Test, Wind Pressure Distribution, Wind Load

---

# 某方形截面超高层建筑风效应风洞试验与荷载规范对比研究

袁深根<sup>1</sup>, 肖曙曦<sup>1</sup>, 周志锦<sup>1</sup>, 李永贵<sup>2</sup>, 李毅<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>湘潭市建筑设计院, 湖南 湘潭

<sup>2</sup>湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

Email: \*engineerliyi@163.com

收稿日期: 2017年1月5日; 录用日期: 2017年1月19日; 发布日期: 2017年1月23日

\*通讯作者。

## 摘要

以钦州北部湾中心主塔楼为研究对象,利用刚性模型测压风洞试验详细研究了该方形截面超高层建筑表面的极值风压分布特性、塔楼主体的风荷载以及风致加速度响应,并将试验结果与荷载规范进行了对比。结果表明:极值负压为幕墙设计的控制风压,荷载规范对建筑立面中心区域的极小风压系数的取值偏于不安全,对拐角区域的取值偏于保守;塔楼主体的基底弯矩等效静力风荷载由平均风荷载控制;风致加速度响应表现为明显的横向效应。本文所获结论可为类似项目提供参考。

## 关键词

高层建筑, 风洞试验, 风压分布, 风荷载

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 工程概况

钦州北部湾中心项目位于广西壮族自治区钦州市主城区,项目规划设计为超高层主楼、高层附楼、裙楼的城市综合体。超高层主塔楼平面设计为  $43.6\text{ m} \times 43.6\text{ m}$  方形布局,高  $220\text{ m}$ ,采用框架核心筒结构。高层附塔楼平面设计为  $48.4\text{ m} \times 21.2\text{ m}$  长方形布局,高  $83\text{ m}$ 。图 1 为项目的效果图。由于钦州属于强/台风地区,为了保证该项目在使用阶段的抗风安全性,对主塔楼进行了刚性模型高频压力积分试验。基于风洞试验结果,本文对该超高层建筑表面极值风压分布特性、塔楼主体风荷载分布以及顶部楼层舒适度进行了详细讨论,并与商业结构分析软件提供的结果及荷载规范建议值进行了对比分析。

## 2. 风洞试验

### 2.1. 试验设备及测量系统

试验在湖南科技大学风工程试验研究中心的大气边界层风洞试验室中进行。该风洞为直流单试验段风洞,截面为  $4.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$  (宽  $\times$  高)的矩形,试验段的风速在  $1.0\sim 30.0\text{ m/s}$  内连续可调。试验过程中,风速测量采用澳大利亚 TFI 公司的眼镜蛇三维脉动风速测量仪,压力测量采用美国 Scanivalve 公司的 Hyscan-1000 电子扫描阀测压系统。

### 2.2. 风场模拟

试验开始之前,采用二元尖塔和粗糙元来模拟大气边界层平均风速和湍流强度分布。根据该高层建筑周围的地貌情况,并结合我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012) [1]中对地面粗糙度的分类规定,在本次试验中模拟了相应的 B 类地面粗糙度风场,平均风速剖面指数  $\alpha = 0.15$ 。图 2 为流场调试后得到的 B 类地面粗糙度的平均风速剖面 and 湍流强度分布剖面。

### 2.3. 试验模型及测点布置

测压试验模型采用 ABS 板制作,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。风洞试验的模型缩尺比均为  $1:300$ ,



Figure 1. Rendering  
图 1. 效果图

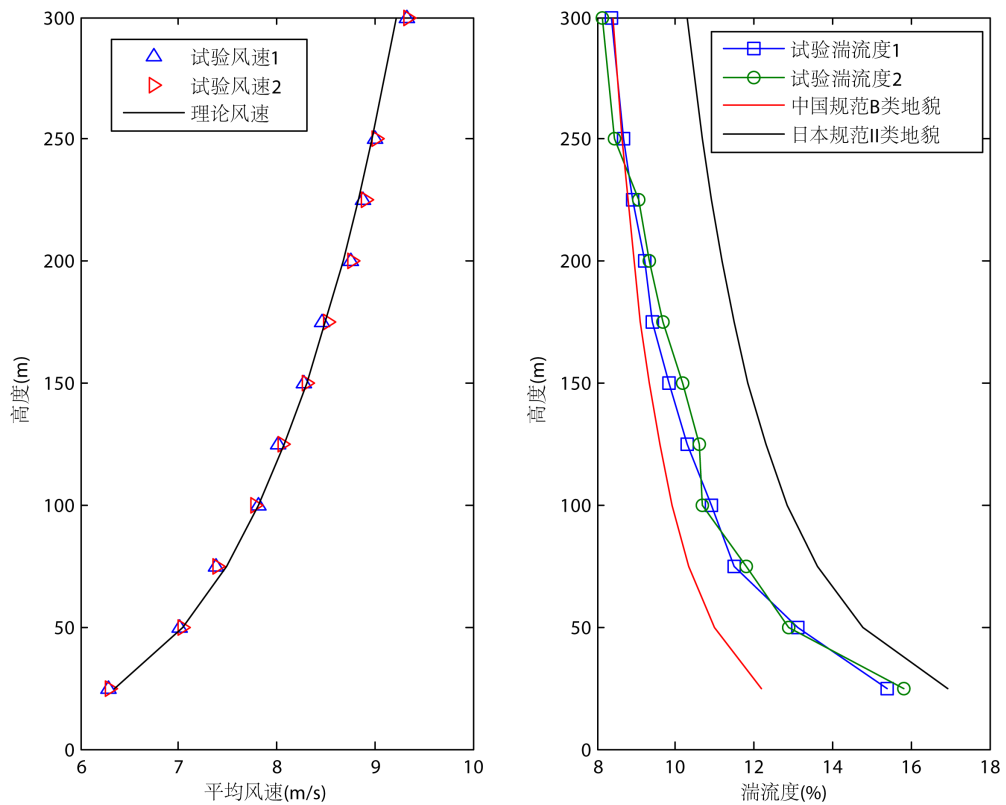


Figure 2. Mean wind speed and turbulence intensity profiles  
图 2. 平均风速剖面及紊流度剖面

满足堵塞度  $< 5\%$  的要求[2]。 $0^\circ$  风向角来流时，测压试验模型整体布置如图 3 所示。

为获取建筑物的表面风压，在主模型表面上共布置了 471 个测点，沿高度共设置 15 层(图 4)。建筑物顶部为外露的玻璃挡板，为获取外、内表面压力差，在该处布置了 28 对双测点，分别同步测试外、内表面的风压；2~14 测点层每层布置 28 个单测点(图 5)。每个测点埋设外径为 1.2 mm、内径为 1.0 mm 的



Figure 3. Models in wind tunnel test  
图 3. 风洞试验模型布置图

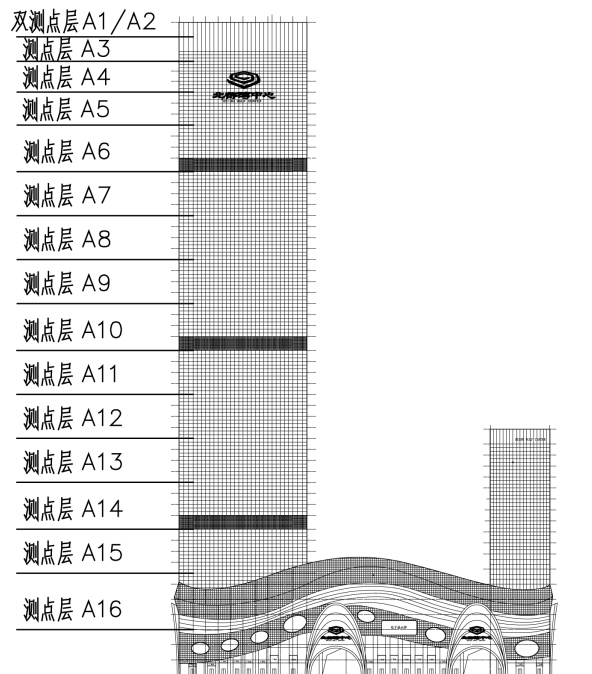


Figure 4. Measurement levels  
图 4. 测点分层图

不锈钢管，测压管垂直于建筑物外表面，并保证与模型表面平齐。测压孔与电子扫描阀之间采用 PVC 管连接，PVC 管的长度控制在 1 m 以下，以保证测量压力的可靠性[3]。

#### 2.4. 试验工况

为考虑周边建筑物对主塔楼表面风效应的干扰作用，刚性模型测压试验分两种情况进行：第一种情况为单体(不考虑周边建筑物的影响)；第二种情况为所有建筑(考虑周边建筑物的影响)。不同情况下，均以每个风向角为一个工况，风向角从  $0^{\circ}$ ~ $360^{\circ}$  变化，顺时针变化，变化间隔为  $10^{\circ}$ ，同时增加了  $45^{\circ}$ 、 $135^{\circ}$ 、 $225^{\circ}$ 、 $315^{\circ}$  的试验结果，试验一共有 80 种工况。试验时取参考点高度为 70 cm，对应大气边界层风场原型的高度为 210.0 m。试验控制风速为 12 m/s。试验过程中，不同角度下各测点风压时程采样频率为 332 Hz，采样时间为 30.12 s，即每个测点在每个风向角下记录了 10,000 个风压时域信号数据。

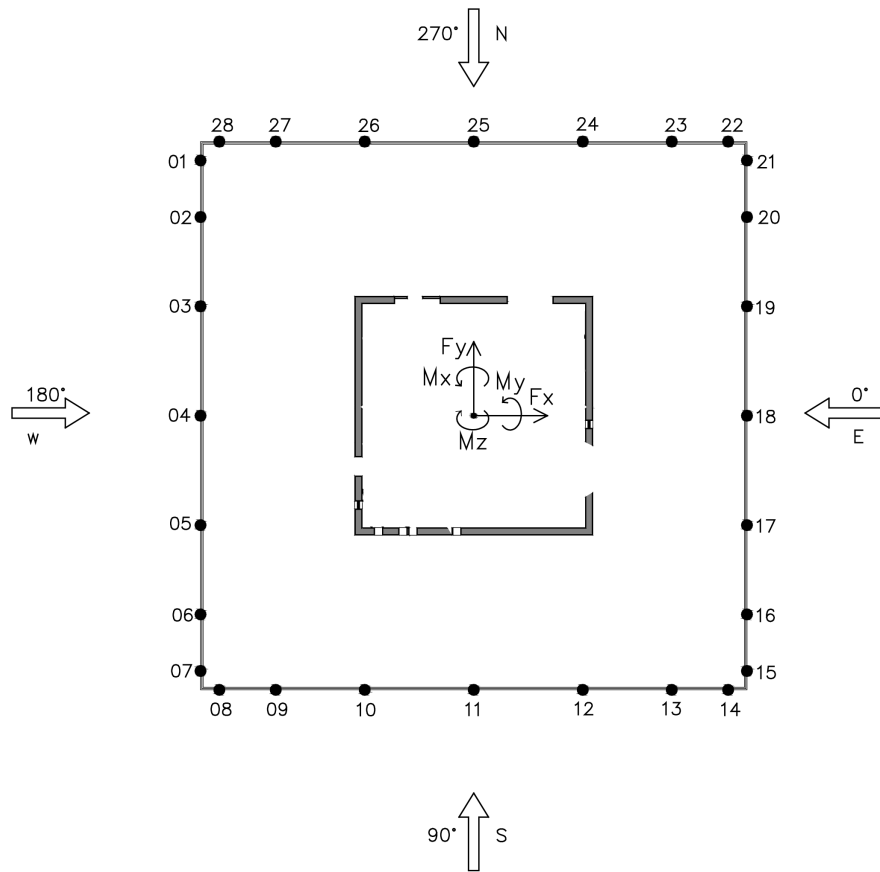


Figure 5. Definitions of pressure taps and wind loads  
图 5. 标准层测点布置图

## 2.5. 数据处理

模型试验中符号约定以压力向内(压)为正, 向外(吸)为负。表面各点的风压系数由下列公式给出:

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

式中:  $c_{pi}(t)$  是试验模型上第  $i$  个测压孔所在位置的风压系数时程,  $p_i(t)$  是该位置上测得的表面风压时程,  $p_0$  和  $p_\infty$  分别为参考点处测得的平均总压和平均静压。外露的玻璃挡板处的内外风压处理方法参考文献[4]。

对风压系数时程  $c_{pi}(t)$  进行数学统计即可得到平均风压系数  $\overline{C_p}$  和脉动风压系数  $C_{p,rms}$ 。极大风压系数  $C_{p,max}$  和极小风压系数  $C_{p,min}$  可以分别用平均风压系数和脉动风压系数的代数和来表示:

$$C_{p,max} = \overline{C_p} + gC_{p,rms} \quad (2)$$

$$C_{p,min} = \overline{C_p} - gC_{p,rms} \quad (3)$$

其中:  $g$  是峰值因子。由于脉动风常近似作为高斯过程考虑[5], 所以本文假设脉动风压也是高斯分布, 取峰值因子  $g = 3.5$ , 符合实际工程需要。

通过对不同测点层的风压结果进行积分, 便可得到各测定层的风荷载时程。在一阶线性振型的假定下[6], 根据随机振动和结构动力学理论, 可得到结构的均方根位移响应:

$$\sigma_r(z) = \phi(z) \left( \int_0^{\infty} |H(n)|^2 S_p(n) dn \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

相应的脉动风引起的各层等效静力风荷载:

$$P_{ef}(z) = \mu m(z) \omega_0^2 \sigma_r(z) \quad (5)$$

式中  $\mu$  是峰值因子, 本文取 2.5, 具有 99.38% 保证率[7]。建筑结构各楼层最大等效静力风荷载等于平均风荷载与脉动风引起的等效静力风荷载之和, 最小等效静力风荷载等于平均风荷载与脉动风引起的等效静力风荷载之差, 即:

$$P_{ESWL,max}(z) = \overline{P(z)} + P_{ef} \quad (6)$$

$$P_{ESWL,min}(z) = \overline{P(z)} - P_{ef} \quad (7)$$

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

$$S_{\ddot{r}}(z,n) = (2\pi n)^4 S_r(z,n) \quad (8)$$

因此加速度均方根响应可如下式计算:

$$\sigma_{\ddot{r}}(z,n) = \left( \int_0^{\infty} ((2\pi n)^4 S_r(z,n) dn) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

结构楼顶加速度峰值为:

$$\ddot{r}_{max} = \mu \sigma_{\ddot{r}}(H) \quad (10)$$

### 3. 结果分析

#### 3.1. 极值风压分布特性

极值风压是幕墙设计关注的重点。为了讨论周边建筑物对主体建筑表面极值风压分布的影响, 图 6 和图 7 分别绘出了全风向角下主体建筑在无、有周边建筑物干扰情况下的极大风压系数和极小风压系数分布的等值线图。

##### 3.1.1. 全风向极大风压系数

无周边建筑物干扰时, 从图 6(a)可以看出, 各立面的极大风压系数沿高度的变化规律相近, 在建筑物的中上部及立面拐角区域较大, 表现为较大的压力, 该区域的极大风压系数均匀分布在 1.4 附近, 与荷载规范建议值 1.45~1.47 (150 m~200 m 高度范围内)接近。中下部的压力相对较小, 大多在 1.1~1.2 之间。在南立面的下部中间区域风压变化剧烈, 数值也减小到 0.9, 这主要是由于受到高度较低(83 m)的附楼的遮挡作用。在顶部外露的玻璃挡板处, 气流表现为强烈的三维绕流效应, 极大风压系数最大达到 1.93, 约为规范建议值 1.44 的 1.34 倍, 应该引起幕墙设计人员的重视。

有周边建筑物干扰时, 从图 6(b)可以看出主体建筑各立面的极大风压系数沿高度的变化规律与无周边建筑干扰时基本一致。局部区域的风压等值线变化加剧, 这可能与扰动作用下气流的脉动增强有关。中上部的极大风压系数维持在 1.5 左右, 比无周边建筑干扰时略有增加。

##### 3.1.2. 全风向极小风压系数

无周边建筑物干扰时, 从图 7(a)可以看出, 主体建筑各立面的极小风压系数沿高度方向没有明显的





的极小风压系数的取值偏于不安全,对拐角区域的取值则偏于保守。

有周边建筑物干扰时,从图 7(b)可以看出各立面的极小风压系数的绝对值在下部区域略有减小,这可能是由于受到周边建筑物的遮挡作用。靠近中上部的极小风压系数相对无周边建筑物是变化不大,仅在局部区域的极小风压系数的绝对值有所增加,这可能跟上游建筑物的尾流干扰有关。总的来看,各立面的极小风压系数的绝对值均要大于相同位置的极大风压系数,这表明极小风压是幕墙抗风设计的控制压力。

### 3.2. 等效静力风荷载

等效静力风荷载是风工程研究人员和结构工程师之间的纽带[8]。对于超限超高层建筑,结构工程师通常需要利用风洞试验提供的等效静力风荷载对主体结构的强度和刚度进行验算,并形成超限审查报告提供给全国超限高层审查委员会进行审查。图 8 给出了有周边建筑干扰时 50 年一遇基本风压作用下钦州北部湾中心主楼基底弯矩等效静力风荷载随风向角的变化规律。由于荷载规范未能直接给出钦州地区的基本风压,因此风荷载的计算参照钦州气象局提供的气象资料[9]取 50 年一遇基本风压为  $0.54 \text{ kN/m}^2$ 。结构的动力特性由设计部门提供,第一阶振型为 X 向平动,自振频率为  $0.375 \text{ Hz}$ ;第二阶振型为 Y 向平动,自振频率为  $0.426 \text{ Hz}$ ;第三阶振型为扭转,自振频率为  $0.490 \text{ Hz}$ 。考虑结构为钢筋混凝土核心筒结构,结构阻尼比取  $0.05$ 。可以看出:1) 在 X、Y 以及 Z 三个方向上,最大和最小等效静力风荷载均与相应方向上的平均风荷载随风向角的变化规律一致,这说明总的等效静力风荷载主要由平均风荷载控制,脉动风荷载的贡献较小。2)  $M_x$ 、 $M_y$  随风向角的变化规律与三角函数随角度的变化规律类似。由于建筑物的截面为方形, $M_x$  的等效静力风荷载绝对值最大发生在  $270^\circ$  风向角,数值为  $2.41 \times 10^9 \text{ N}$ , $M_y$  的等效静力风荷载绝对值最大发生在  $180^\circ$  风向角,数值为  $2.43 \times 10^9 \text{ N}$ ,两者数值相近。3)  $M_z$  的数值大多为  $M_x$  或  $M_y$  的 5% 以内,但在个别角度由于脉动风的不对称性加强, $M_z$  的等效静力风荷载绝对值也能达到相应角度下  $M_x$  的 27%,需引起结构工程师的重视。

对于外形规则的高层建筑,结构设计师可根据荷载规范中对相关系数的规定,结合商业结构计算分析软件预先计算各楼层的风荷载。考虑到风洞试验提供的  $F_x(180^\circ)$  和  $F_y(270^\circ)$  最不利结果均发生在正交方向,与结构计算软件计算风荷载时一致。图 9 给出了 50 年一遇基本风压作用时最不利风向角下 X 和 Y 方向楼层风荷载试验结果与有限元结果比较。可以看出,1)  $F_x$  的试验值随楼层高度的变化规律在大部分楼层均与 PKPM 值吻合较好,数值比 PKPM 结果略微偏大;由于顶部三维流和风洞底面的影响,顶部和底部试验结果与 PKPM 值差异较大。2)  $F_y$  的试验结果随楼层高度的变化规律与  $F_x$  基本一致,但相对  $F_x$  而言, $F_y$  的试验结果比 PKPM 结果大,这与周边干扰有关。

### 3.3. 风致加速度

与结构的安全性相比,超限超高层建筑在风荷载作用下的使用性更加引人关注。我国《高层建筑混凝土结构技术规程》[10]规定,高度不小于  $150 \text{ m}$  的高层建筑结构应具有良好的使用条件,要满足相应的舒适度要求。即在 10 年一遇的基本风压作用下计算的顺风向和横风向楼层顶部加速度:住宅和公寓不超过  $0.15 \text{ m/s}^2$ ,办公楼和旅馆不超过  $0.25 \text{ m/s}^2$ 。图 10 给出了 10 年一遇基本风压作用下由风洞试验得到的顶部楼层风致加速度随风向角变化曲线。可以看出:1) X 向加速度最大值发生在  $90^\circ$  和  $270^\circ$  风向角, Y 向加速度最大值发生在  $0^\circ$  和  $180^\circ$  风向角,均表现出明显的横风向效应。2) 扭转向加速度相对 X 和 Y 向较小,这与建筑的截面为方形对称截面有关。3) X 向加速度最大值为  $0.123 \text{ m/s}^2$ , Y 向加速度最大值为  $0.109 \text{ m/s}^2$ ,均满足高规的限值要求。



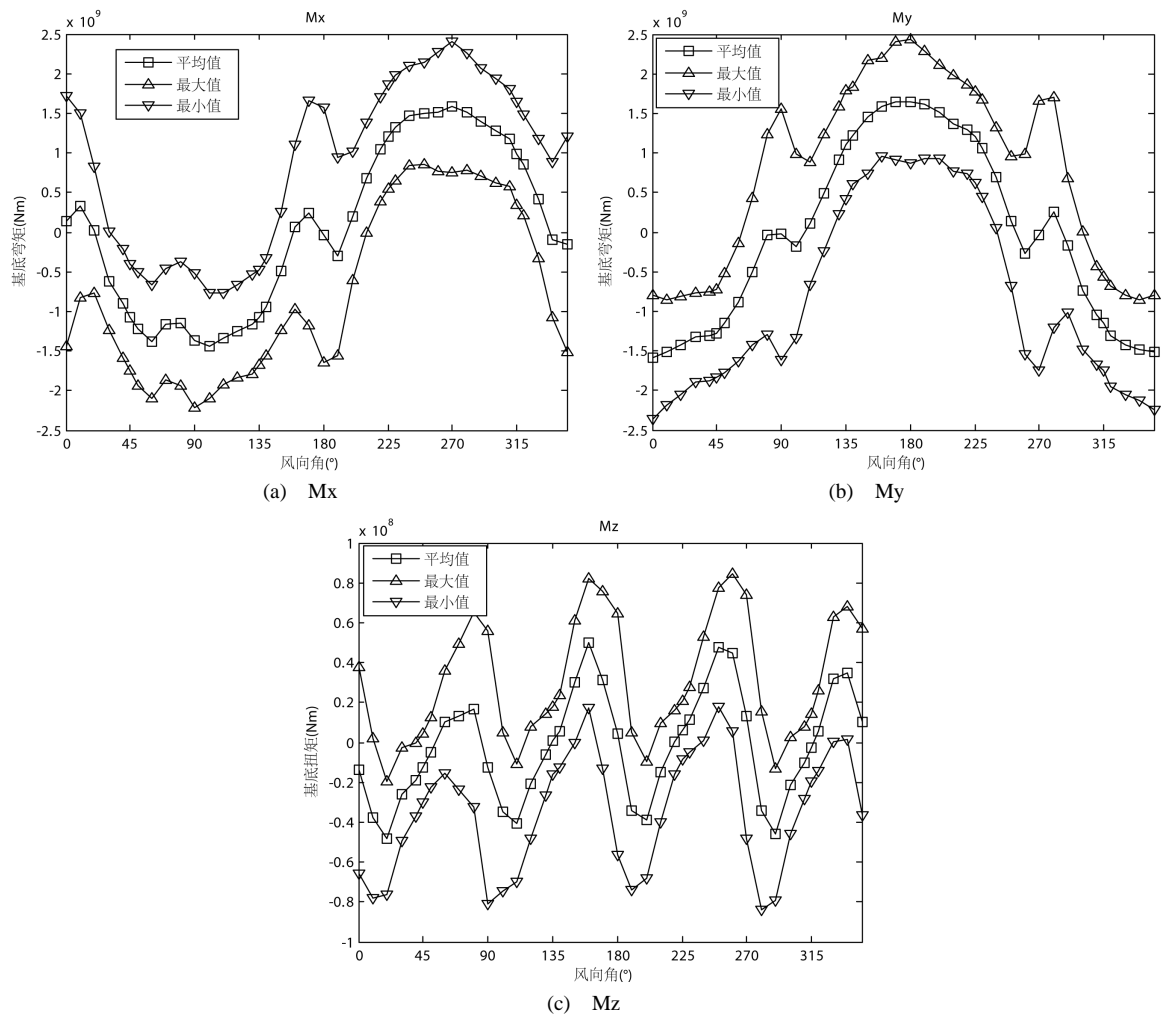


Figure 8. Variations of equivalent static overturning moments with wind direction  
 图 8. 基底弯矩等效静力风荷载随风向角的变化规律

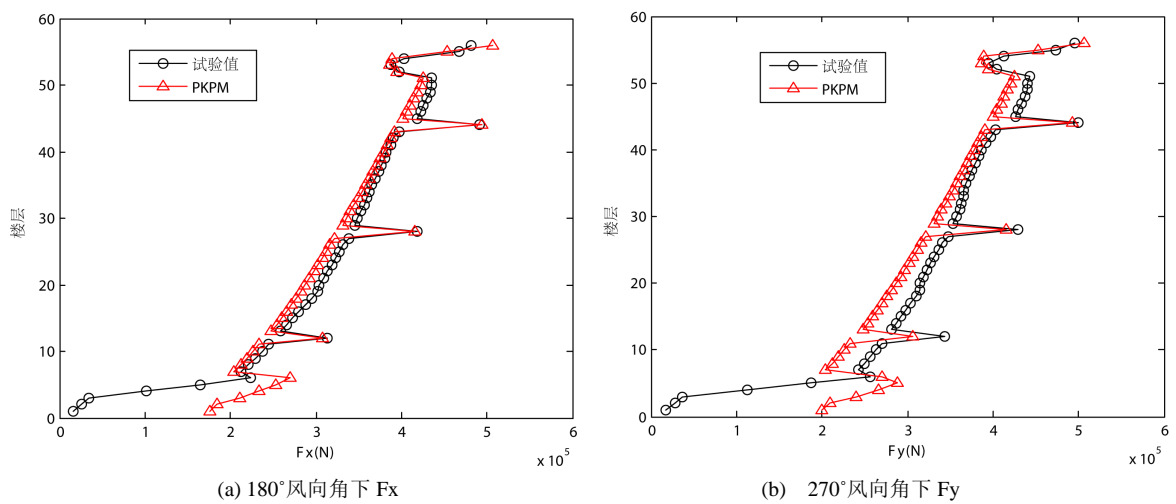
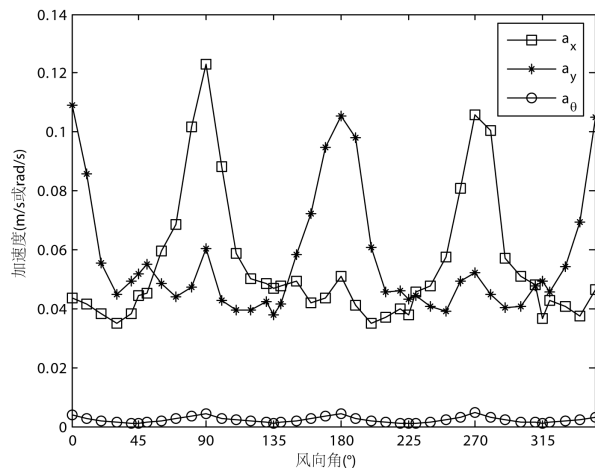


Figure 9. Variations of the local wind forces with elevations under the unfavorable wind direction  
 图 9. 最不利风向角下楼层风荷载随高度变化曲线图



**Figure 10.** Variations of wind-induced accelerations in the top floor with wind direction

**图 10.** 顶部楼层风致加速度随风向角变化曲线图

## 4. 结论

风洞试验是评估超限超高层建筑风荷载的常有效方法。本文以钦州北部湾中心主楼为研究对象，详细研究了该方形截面超高层建筑表面极值风压系数、主塔楼风荷载及风致加速度的特性。可以得到以下结论：

- 1) 极值风压为幕墙设计的控制风压。荷载规范对立面中心区域的极小风压系数的取值偏于不安全，对拐角区域的取值则偏于保守。
- 2) 基底弯矩等效静力风荷载由平均风荷载控制。 $M_x$ 、 $M_y$  随风向角的变化规律与三角函数随角度的变化规律类似。由于脉动风的不对称性，个别角度  $M_z$  的等效静力风荷载绝对值也能达到相应角度下  $M_x$  的 27%，需引起结构工程师的重视。
- 3) 对于方形截面的超限超高层建筑，PKPM 可以较好地估算楼层风荷载，但周边建筑物的存在也会导致 PKPM 计算的结果偏小。因此，有必要对通过风洞试验来评估周边建筑物的干扰作用。
- 4) 水平方向加速度表现明显的横风向效应，方形截面的扭转加速度相对水平方向较小。

## 基金项目

国家自然科学基金资助(51508183)，湖南省教育厅开放基金资助(15K044)。

## 参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] 埃米尔·希缪, 罗伯特·H·斯坎伦. 风对结构的作用——风工程导论[M]. 刘尚培, 项海帆, 等, 译. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [3] 顾明, 李刚, 黄鹏, 等. 某大厦风荷载试验研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(3): 113-115.
- [4] 李毅, 李秋胜. 某典型高层建筑表面风压分布特性及干扰效应试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(2): 87-92.
- [5] Davenport, A.G. (1967) Gust Loading Factors. *Journal of the Structural Division*, **93**, 11-34.
- [6] 徐安, 谢壮宁, 倪振华. 用瞬态测压法研究高层建筑的等效设计风荷载[J]. 土木工程学报, 2004, 37(9): 11-16.
- [7] 熊铁华. 新旧荷载规范关于风振系数表达形式的比较研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(12): 149-154.
- [8] 叶丰. 高层建筑顺、横风向和扭转方向风致响应及等效静力等效风荷载研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大

学, 2004.

- [9] 邝良俊, 陆晓丽, 张峰. 钦州市气象资料证明[R]. 钦州市气象科技服务中心, 2014.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ3-2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)