

# Study of Wind Loads on Typical High-Rise Building by Wind Tunnel Test

Jingyi Zhao<sup>1\*</sup>, Fubin Chen<sup>2#</sup>, Qiurui Cai<sup>2</sup>, Mingliang Zhang<sup>3</sup>, Li Lin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Jinan Lixia Holding Group CO. LTD., Jinan Shandong

<sup>2</sup>School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

<sup>3</sup>Hunan NO.6 Engineering CO. LTD., Changsha Hunan

<sup>4</sup>Institute of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen Fujian

Email: 18653134480@163.com, #75162016@qq.com

Received: Jun. 29<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jul. 13<sup>th</sup>, 2017; published: Jul. 18<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

Wind loads and wind responses of high-rise building are analyzed in detail, based on the wind tunnel test data of Tower-A. And then the design wind loads for curtain wall, structure subject, and wind induced acceleration response have been obtained. The results show that: 1) Significant interference effects by around buildings were found; 2) The maximum design wind loads for structure subject occurred on oblique wind direction, such as 195° and 240°. The results are expected to be very useful for the wind load design of the Tower.

## Keywords

High-Rise Building, Wind Tunnel Test, Wind Load, Wind Effect, Interference Effect

# 典型高层建筑风荷载风洞试验研究

赵敬义<sup>1\*</sup>, 陈伏彬<sup>2#</sup>, 蔡虬瑞<sup>2</sup>, 张明亮<sup>3</sup>, 林立<sup>4</sup>

<sup>1</sup>济南历下控股集团有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>长沙理工大学土木与建筑学院, 湖南 长沙

<sup>3</sup>湖南省第六工程有限公司, 湖南 长沙

<sup>4</sup>厦门理工学院土木工程与建筑学院, 福建 厦门

Email: 18653134480@163.com, #75162016@qq.com

收稿日期: 2017年6月29日; 录用日期: 2017年7月13日; 发布日期: 2017年7月18日

\*第一作者。

#通讯作者。

## 摘要

基于A塔楼风洞试验数据,本文详细分析了风荷载特性与风致响应特征,得到了结构表面幕墙设计荷载、结构主体设计荷载以及结构加速度响应。结果表明:1) 周边建筑对风荷载分布影响较大,出现明显的干扰效应;2) 结构主体设计风荷载最大值发生在斜风向,如 $195^\circ$ 和 $240^\circ$ 。所得结果可为该塔楼风荷载设计提供依据。

## 关键词

高层建筑, 风洞试验, 风荷载, 风致效应, 干扰效应

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. 引言

随着设计经济的高速发展,人口膨胀,土地资源日趋紧缺,建筑不断向高度方向发展,以高层建筑为主体的建筑群体不断涌现。伴随着高强材料的使用,建筑的随着高度的增长,结构越来越柔、阻尼比越来越小,风荷载成为其主要的控制荷载之一[1] [2]。现行的《建筑结构荷载规范》[3]对简单的单体建筑的体型系数有相关规定,而对于处于复杂周边条件下的高层建筑风荷载并未涉及。数值模拟和风洞试验是开展待建建筑风荷载研究的主要手段,受到现有数值模拟技术的局限性,目前主要是通过风洞试验确定结构设计风荷载[4]。

济南历下区金融商务服务中心位于济南市历下区经十东路,其主要功能以办公为主,兼含金融机构的商务及其他用途。由两栋塔楼构成,A塔楼高193.8米,B塔楼高140.2米,A、B塔楼由裙楼连接,且项目周边有较多的高层建筑。根据我国《建筑结构荷载规范》[3],应通过风洞试验确定风荷载,以供设计使用。出于篇幅的限制,本文仅以A塔楼作为分析对象。

## 2. 风洞试验

### 2.1. 试验概况

风洞试验是在湖南大学建筑与环境风洞实验室进行的。该风洞为直流式矩形截面边界层风洞,试验段截面尺寸为3.0 m(宽)×2.5 m(高),风速范围在0~20.0 m/s内可调。流场性能良好,试验区流场的速度不均匀性小于1%、湍流度小于0.46%、平均气流偏角小于0.5度。地貌类型按国家《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)[3]的C类地貌考虑,地貌粗糙度系数 $\alpha = 0.22$ 。在实验之前,以粗糙元、挡板和二元尖塔来模拟C类地貌的风剖面及湍流度分布,如图1所示模拟结果与目标值吻合得较好。

### 2.2. 试验模型与测点布置

试验模型是用ABS板制成的刚体模型,具有足够的强度和刚度。模型与实物在外形上保持几何相似,缩尺比为1:300。试验模型外表开设许多风压孔,并将模型内部挖空,装设测压管,最后将模型安放在风洞试验段,并将测压管接至电子式压力扫描阀,对建筑物幕墙表面风压进行测量。周边环境模型比例也

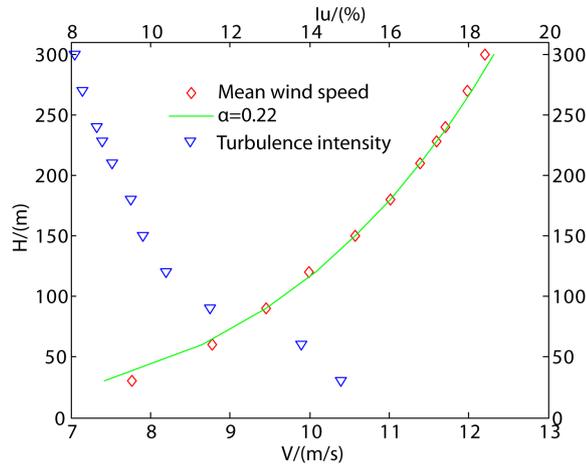


Figure 1. Profiles of mean wind speed and turbulence  
图 1. 平均风速剖面与湍流剖面

为 1:300。将模型固定在风洞试验室的转盘上，主体模型置于转盘中心，相对位置如图 2 及图 3 所示。

为了测取幕墙上的风压分布，在模型外表面上共布置了个 370 测点，B 塔楼。风洞试验时，每一个风向测量一组数据。风向角间隔为  $15^\circ$ ，逆时针旋转，风向角的定义如图 3 所示，总共有 24 个风向。试验时，对每个测点，采样时间为 32 秒，采样频率为 312.5 Hz，试验控制风速为 10 m/s。

### 2.3. 数据处理

模型试验中以压力向内(压)为正，向外(吸)为负。表面各点的风压系数由下式(1):

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

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， $p_i(t)$  是该位置上测得的表面风压值， $p_0$  和  $p_\infty$  分别为参考点处测得的平均总压和平均静压。

脉动风压可通过公式(2)来求得脉动风压均方根值  $C_{prms}$ ：

$$C_{prms} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (C_{pik} - \overline{C_p})^2 / (N-1)} \quad (2)$$

其中： $C_{pik}$  为第  $i$  个测压孔所在位置的风压系数时程， $\overline{C_p}$  为平均风压系数， $N$  为样本数。

测点的峰值风压系数：

$$C_{pmax} = \overline{C_p} + gC_{prms} \quad (3)$$

$$C_{pmin} = \overline{C_p} - gC_{prms} \quad (4)$$

其中， $\overline{C_p}$  为平均风压系数， $g$  是峰值因子。本文取峰值  $g = 2.5$ 。

超高层建筑作为悬臂结构，其风致响应的运动微分方程可以写为：

$$m(z) \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} + c(z) \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ E(\zeta) \frac{\partial^2 \rho}{\partial \zeta^2} \right] = f(z, r) \quad (5)$$

式中：位移响应  $r(z, t)$  可以是  $x$  向位移或者  $y$  向位移； $m(z)$ 、 $c(z)$ 、 $EJ(z)$  分别是结构沿铅锤方向  $z$  单位高度的质量、阻尼系数和抗弯刚度； $f(z, r)$  是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。



Figure 2. Models in wind tunnel  
图 2. 风洞试验模型

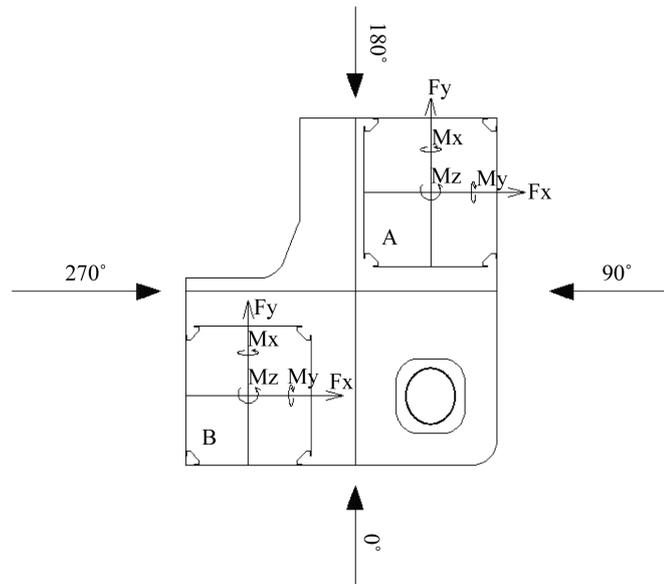


Figure 3. Schematic diagram of wind directions  
图 3. 风向角示意图

对于超高层建筑的风致响应可以只考虑第一阶振型的贡献，因而  $r(z,t)$  按振型展开为：

$$r(z,t) = \phi(z)q(t) \quad (6)$$

则位移响应功率谱  $S_r(z,n)$  与主坐标功率谱  $S_q(z,n)$  的关系是：

$$S_r(z,n) = \phi^2(z)S_q(n) \quad (7)$$

式中： $n$  是风压脉动频率。根据随机振动理论，主坐标功率谱  $S_q(z,n)$  可表示为：

$$S_q(n) = |H(n)|^2 S_p(n) \quad (8)$$

其中： $S_p(n)$  是有广义力时间序列得到的广义力功率谱， $H(n)$  是结构复频响应函数。

于是结构的均方根位移响应可按下式计算：

$$\sigma_r(z) = \phi(z) \left( \int_0^{\infty} |H(n)|^2 S_p(n) dn \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

相应的脉动风引起的各层等效静力风荷载:

$$P_{ef}(z) = \mu m(z) \omega_0^2 \sigma_r(z) \quad (10)$$

式中  $\mu$  是保证系数,  $\mu$  取值一般在 2.5~4 之间, 本报告取 2.5。需要注意的是, 有的文献称  $P_{ef}(z)$  为等效风振力或者惯性力, 其实不是一般意义上的惯性力, 按式(10)得到的  $P_{ef}(z)$  是将工程上习惯称呼的背景分量及共振分量都已包括在内。

这样, 建筑结构各楼层总的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, 即:

$$P_{ESWL}(z) = \overline{P(z)} + P_{ef} \quad (11)$$

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:

$$S_{\ddot{r}}(z, n) = (2\pi n)^4 S_r(z, n) \quad (12)$$

因此加速度均方根响应可如下式计算:

$$\sigma_{\ddot{r}}(z, n) = \int_0^{\infty} \left( (2\pi n)^4 S_r(z, n) dn \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

结构楼顶加速度峰值为:

$$\ddot{r}_{\max} = \mu \sigma_{\ddot{r}}(H) \quad (14)$$

### 3. 结果分析

#### 3.1. 围护结构设计风荷载

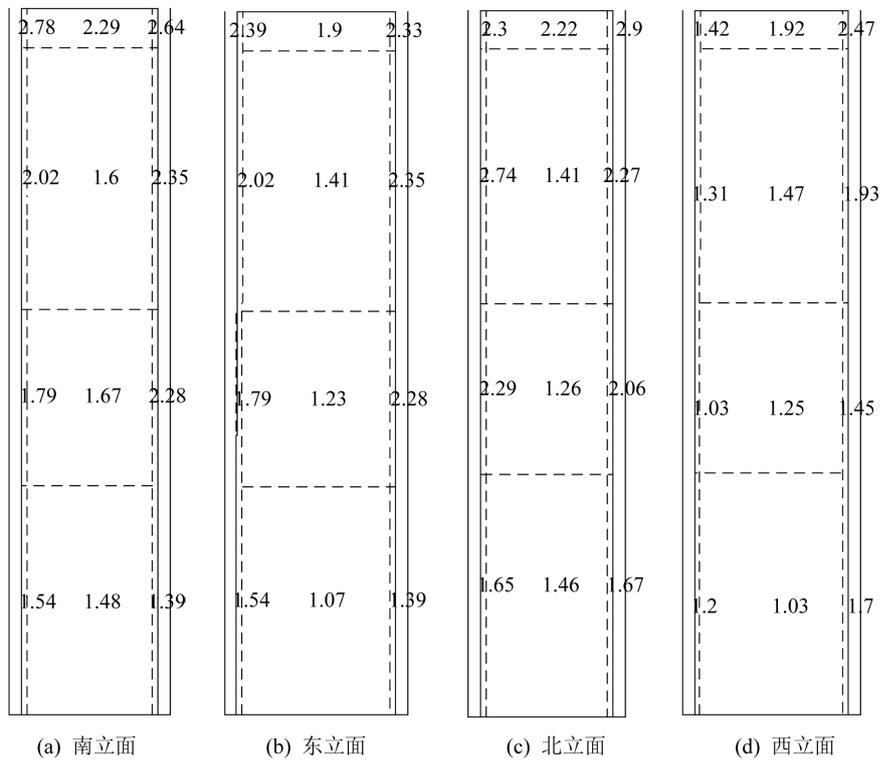
气流流经建筑物时, 发生分离、旋涡脱离以及再附等现象, 其局部风压特性比较复杂。当气流垂直建筑表面时, 往往产生马蹄涡[2]。在周边建筑干扰下又会出现明显的“遮挡效应”和“峡谷风效应”[4][5][6]。由于 A 塔楼周边存在较多高层建筑, 在干扰效应作用下, 必然对局部风荷载有一定的影响。

围护结构设计风荷载可通过两种方法获得, 其一就是根据现行《建筑结构荷载规范》[3]给出的围护结构风荷载(见规范 8.1.1-2); 另外一种方法就是根据风洞试验结果, 根据概率理论进行计算, 如式(3)和(4)。本文根据第二种方法, 给出了用于覆盖层设计用的风荷载设计值, 图 4 和图 5 分别给出了用于围护结构设计用的 50 年重现期极值峰值分布图。

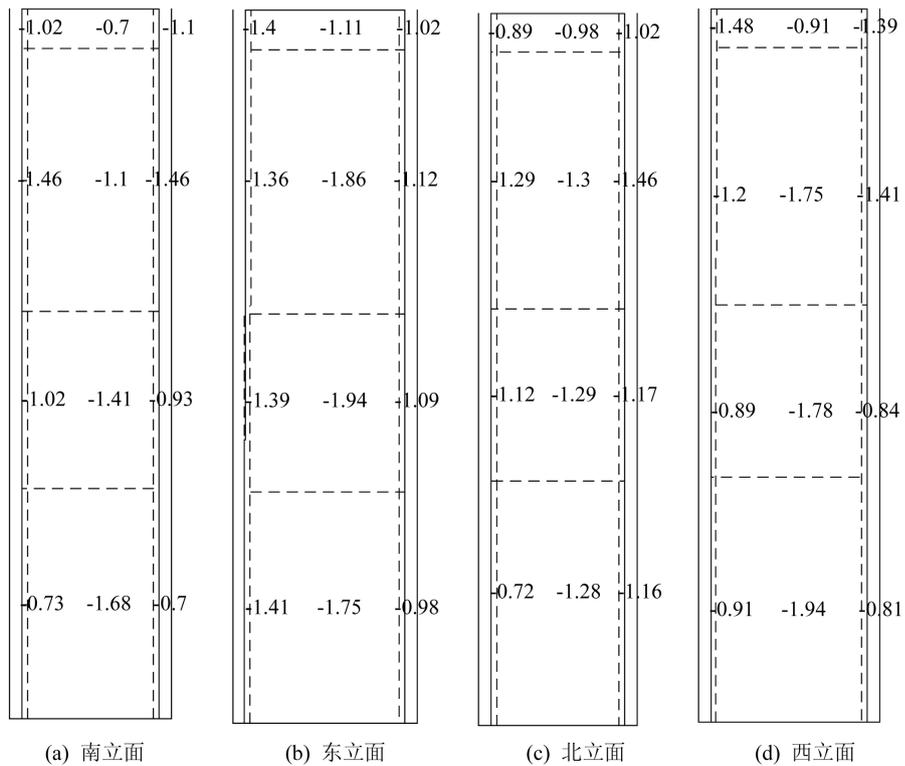
#### 3.2. 结构设计等效风荷载

本文根据随机振动理论, 采用上式(5)~式(11), 得到了基底等效静力风荷载与楼层等效静力风荷载, 如表 1 和图 6。为了便于对比分析, 图 6 同时给出了楼层等效静力风荷载的规范值。

从表 1 可以看出, 基底反力随着风向角的变化而不同, 基底反力最大值并不是发生在来流垂直于建筑物的迎风面(如  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$ , 此时基底剪力远小于规范值), 而是发生在斜风工况下( $195^\circ$ 、 $210^\circ$ 、 $240^\circ$ ), 这主要受建筑物的干扰效应的影响[4][5][6]。从表 1 还可以看出, 虽然在  $195^\circ$ 、 $210^\circ$ 、 $240^\circ$  风向向下, 基底剪力达到了最大值, 但仍小于规范值。表明周边建筑对目标建筑整体风荷载起到了遮挡效应, 对结构设计时有利的。



**Figure 4.** Maximum positive design wind pressures for building envelope (Unit: kPa)  
**图 4.** 围护结构最大正风压设计值(单位: kPa)



**Figure 5.** Maximum negative design wind pressures for building envelope (Unit: kPa)  
**图 5.** 围护结构最大负风压设计值(单位: kPa)

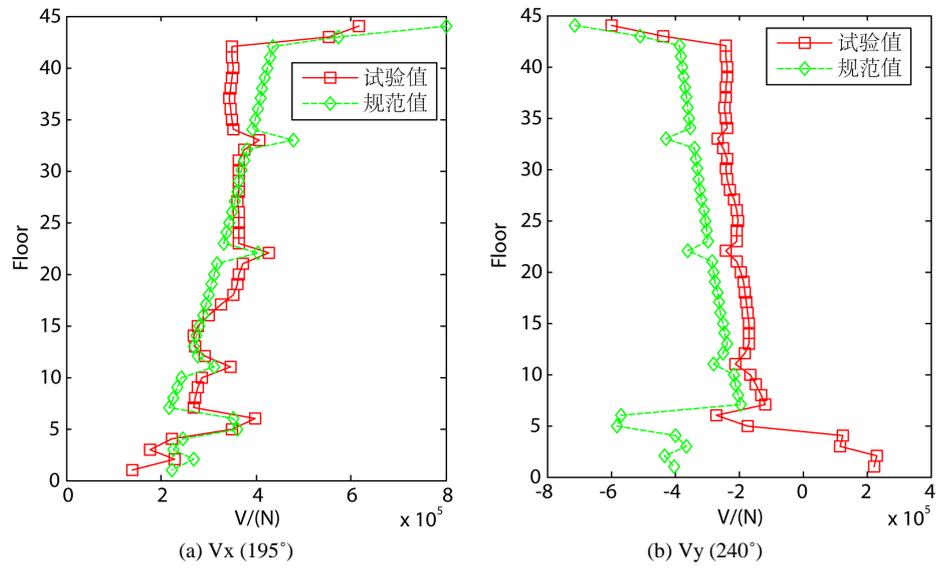


Figure 6. Equivalent static wind loads for floors  
 图 6. 楼层等效静力风荷载

Table 1. Base ESWLs for return period of 50y (damping ratio: 5%)  
 表 1. 50 年重现期基底等效静力风荷载(阻尼比: 5%)

风向角	Vx(N)	Vy(N)	Mx(N·m)	My(N·m)
0°	-6.50E+06	1.08E+07	1.08E+09	-7.71E+08
15°	-5.42E+06	1.19E+07	1.09E+09	-6.90E+08
30°	-7.17E+06	1.29E+07	1.14E+09	-9.12E+08
45°	-8.71E+06	1.25E+07	1.06E+09	-1.07E+09
60°	-1.22E+07	1.37E+07	1.03E+09	-1.45E+09
75°	-9.79E+06	1.08E+07	9.50E+08	-1.18E+09
90°	-8.22E+06	-4.15E+06	-4.31E+08	-9.70E+08
105°	-8.36E+06	-9.38E+06	-7.74E+08	-9.95E+08
120°	-9.54E+06	-1.08E+07	-8.78E+08	-1.11E+09
135°	-8.75E+06	-1.15E+07	-9.69E+08	-1.01E+09
150°	-8.19E+06	-1.27E+07	-1.06E+09	-9.89E+08
165°	-5.92E+06	-1.27E+07	-1.04E+09	-7.95E+08
180°	1.12E+07	-1.16E+07	-1.10E+09	1.20E+09
195°	1.50E+07	-1.40E+07	-1.46E+09	1.59E+09
210°	1.35E+07	-1.40E+07	-1.47E+09	1.42E+09
225°	1.19E+07	-1.11E+07	-1.18E+09	1.29E+09
240°	1.41E+07	-8.23E+06	-1.05E+09	1.64E+09
255°	1.27E+07	-5.78E+06	-7.70E+08	1.55E+09
270°	8.50E+06	3.80E+06	3.58E+08	1.10E+09
285°	6.62E+06	4.59E+06	5.74E+08	8.69E+08
300°	6.71E+06	6.00E+06	7.14E+08	8.41E+08
315°	7.13E+06	7.51E+06	9.21E+08	9.00E+08
330°	8.86E+06	9.27E+06	1.03E+09	1.09E+09
345°	7.48E+06	1.10E+07	1.08E+09	9.21E+08
规范值	1.54E+07	1.49E+07	1.61E+09	1.77E+09

为了便于研究建筑干扰是影响，本文将楼层等效静力风荷载与规范值进行对比，如图 6 所示。从图 6 可以看出，楼层荷载试验值与规范值在研究楼层高度上具有一致性，特别是荷载突变楼层。从图 6(b) 发现，在底部的 4 个楼层，在 240°风向下，受到底部旋转气流影响，呈现荷载反向的现象，虽然对整体风荷载影响甚小，也应引起重视。

### 3.3. 风致结构响应

按照《高层建筑混凝土结构技术规程》[7]的规定，高层建筑结构应具有良好的使用条件，满足舒适度要求，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》[3]规定的 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不应超过表 2 的限值。

本文基于 10 年一遇风荷载取值和风洞试验数据，采用上式(12)~式(14)，计算得到结构顶部峰值加速度，如表 3 所示。结构顶部 X 向最大加速度为 0.126 m/s<sup>2</sup>，Y 向为 0.083 m/s<sup>2</sup>，平动舒适度满足规范要求。

**Table 2.** Limited value of acceleration response for structure top

**表 2.** 结构顶部加速度响应限值

使用功能	峰值加速度限值(m/s <sup>2</sup> )
住宅、公寓	0.15
办公楼、酒店	0.25

**Table 3.** Top acceleration responses for return period of 10y (damping ratio: 2%)

**表 3.** 10 年重现期结构顶部加速度响应(阻尼比: 2%)

风向角	ax (m/s <sup>2</sup> )	ay (m/s <sup>2</sup> )
0°	0.111	0.050
15°	0.083	0.039
30°	0.084	0.045
45°	0.062	0.046
60°	0.063	0.051
75°	0.052	0.075
90°	0.044	0.068
105°	0.047	0.062
120°	0.052	0.055
135°	0.062	0.046
150°	0.071	0.047
165°	0.082	0.043
180°	0.092	0.040
195°	0.104	0.074
210°	0.068	0.083
225°	0.055	0.067
240°	0.055	0.067
255°	0.060	0.066
270°	0.066	0.051
285°	0.072	0.066
300°	0.077	0.082
315°	0.080	0.075
330°	0.122	0.055
345°	0.126	0.053

## 4. 结论

通过对项目 A 塔楼进行刚性模型测压试验, 获得了幕墙设计风荷载与主体结构设计风荷载以及风致加速度响应, 为此结构的安全设计提供了可靠的风荷载依据。得出以下结论:

- 1) 现有规范给出的荷载设计值是基于无周边建筑的工况, 与实际工程存在较大差异;
- 2) 在干扰效应作用下, 结构表面局部风荷载有所增大, 同时受到周边建筑的遮挡作用, 整体风荷载有所降低;
- 3) 风洞试验可以提供多角度、复杂周边工况结果, 可为结构精细化设计提供科学依据。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(51408062, 51541809), 湖南省创新平台与人才计划项目(2015RS4050); 中国博士后基金(2015M572238); 湖南省教育厅项目(15C0054); 长沙理工大学桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室开放基金(13KB01); 长沙理工大学土木工程湖南省优势特色重点学科创新性项目; 湖南省研究生科研创新项目(CX2016B397); 福建省建筑产业现代化闽台科技合作基地开放基金。

## 参考文献 (References)

- [1] Cermak, J.E. (2003) Wind-Tunnel Development and Trends in Applications to Civil Engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **91**, 355-370. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00396-3](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00396-3)
- [2] 埃米尔·希缪, 罗伯特·斯坎伦, 著. 风对结构的作用——风工程导论[M]. 刘尚培, 项海帆, 谢霖明, 译. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 《建筑结构荷载规范》GB5009-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [4] 吴雪, 李秋胜, 李毅. 复杂体型高层建筑表面风压分布及风荷载特性试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(1): 76-82.
- [5] 陈伏彬, 吕记斌, 李秋胜, 等. 前方建筑对高层建筑风压分布的干扰效应研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(9): 50-53.
- [6] 李永贵, 李秋胜. 某高层建筑结构风致效应干扰效应研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(10): 139-142.
- [7] 中国建筑科学研究院, 主编. 《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3-2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

### 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)