

复杂环境下有外附网架高层建筑表面风压特性^{*}

涂楠坤^{1,2}, 全涌¹, 顾明¹, 严志威¹

(1 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2 绿地控股集团有限公司, 上海 200023)

[摘要] 基于刚性模型的表面风压测量风洞试验,对一外附网架的超高层建筑的局部风压分布特性进行了分析,详细讨论了复杂周边环境和外附网架对近似椭圆形截面超高层建筑表面风压系数的影响。研究表明,外附网架会显著削弱迎风面和侧面上的风压系数均方根值以及侧面上的风压系数均值,但对迎风面上的风压系数均值影响不大;复杂周边环境会使建筑受遮挡区域表面的风压系数正极值明显降低,而从上游施扰建筑脱落的尾流有可能会增大目标建筑侧面的负风压系数极值。

[关键词] 高层建筑; 复杂周边环境; 外附网架; 风压

中图分类号: TU973.2⁺13 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2015)S2-0482-08

Analysis on wind pressures of a high-rise building with attached grid in complex environment

Tu Nankun^{1,2}, Quan Yong¹, Gu Ming¹, Yan Zhiwei¹

(1 State Key Laboratory for Disaster Reduction In Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2 Greenland Holding Group Co., Ltd., Shanghai 200023, China)

Abstract: With wind pressure measurement technique, the rigid model of an actual super-tall building with attached grid was tested to obtain local wind pressure distribution characteristics and aerodynamic interference effect of complex surroundings and attached grid on wind pressures of principle building with approximate ellipse cross section. The results indicate that the attached grids can obviously decrease most unfavorable negative coefficients of wind pressure, mean and RMS coefficients of local wind pressures on windward surfaces, but it faintly affects most unfavorable positive coefficients, mean and RMS coefficients of local wind pressures on side faces. Complex surroundings would significantly reduce the most unfavorable positive coefficient of the sheltering area of principle building, and the vortex shedding upstream intends to increase the absolute value of most unfavorable negative coefficients on side faces.

Keywords: high-rise building; the complex surrounding; attached grids; wind pressure

0 前言

密集超高层建筑群间的干扰效应是非常复杂的。文献[1]~[5]对高层建筑间的干扰机理进行了大量的研究,提出了遮挡效应和穿堂风效应,以及对目标建筑响应谱的影响。建筑本身的外形特征对风荷载的影响也是非常显著的;Kwok K C S^[6]认为水平开槽、角部开槽以及切角处理能够降低高层建筑风振响应;Kim Y M等^[7]认为使建筑物沿高度方向锥度化可以有效地抑制横风向风振响应;Peter A Irwin^[8,9]和Kawai H^[10]对建筑立面上开洞、截面阶梯变化或流线化、设置扰流板等不同气动措施进行了大量的研究。然而目前针对外附网架这种附属结构对风荷载的影响的研究尚未见过。本文通过对一栋超高层建筑有无外附网架模型的试验结果进行对比,就外附网架对超高层建筑表面风压的影响进行初步探索。

1 试验概况

成都金融城(简称目标建筑)是由两幢外形完全相同的塔楼(目标建筑及其姊妹楼)组成,如图1所示。目标建筑高206m,横截面是一长轴约为38m、短

轴约为25m的椭圆形,长轴的南端被切除,切除部分随离地高度逐步缩进。目标建筑立面上外附一层镂空率约为68%的铝合金网架,网架距离建筑幕墙为90cm左右,由6cm宽的铝条构成。目标建筑及其姊妹楼呈轴对称布置,最近处相距25m。在目标建筑长轴的延长线上有一高度为175m的横截面近似方形的周边干扰建筑。除此之外,其他周边干扰建筑高度都在100m以下。

同济大学土木工程防灾国家重点实验室对建筑进行了刚性模型表面风压测量风洞试验。风洞试验在TJ-2大气边界层风洞中进行,风洞试验段长15m、宽3m、高2.5m。风洞试验模型的几何缩尺比为1/300,受限于模型制作精度,风洞试验模型中外附铝合金网架的铝条宽度为0.5mm(即原型空间15cm),保持镂空率不变。目标建筑及周边建筑风洞试验模

^{*} 国家自然科学基金资助(50878159,90715040),上海市浦江人才计划(08PJ1409500)。

作者简介:涂楠坤,硕士,Email:243569261@qq.com。



图 1 目标建筑效果图



图 2 风洞试验模型图

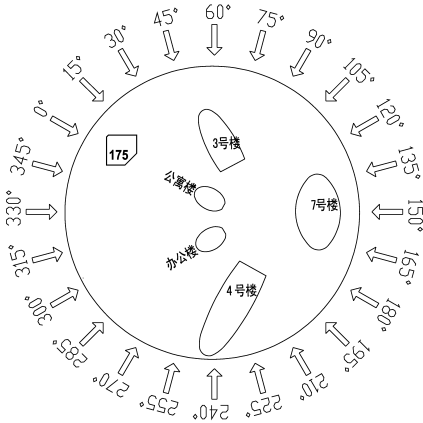
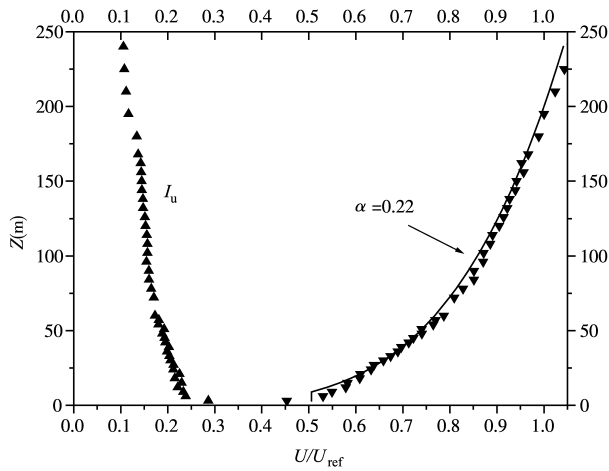
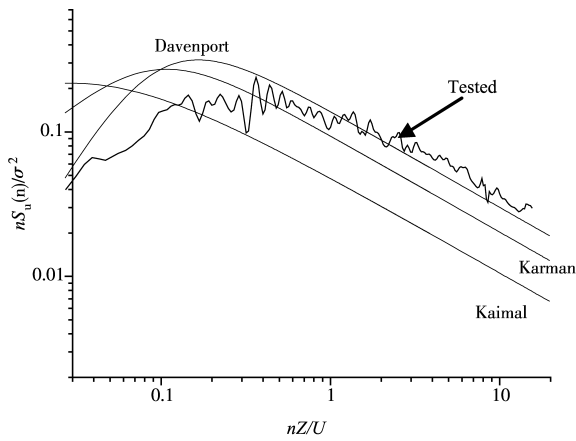


图 3 风向角定义

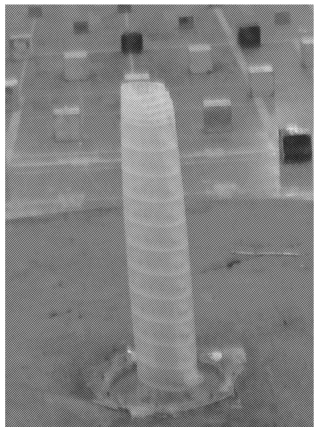


(a) C 类风场平均风速

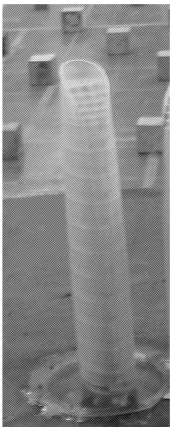


(b) 湍流强度剖面脉动风功率谱

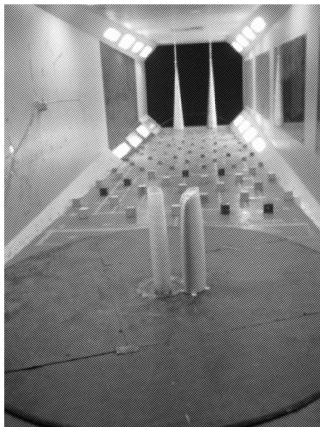
图 4 风洞中模拟的 C 类风场平均风速、湍流强度剖面脉动风功率谱



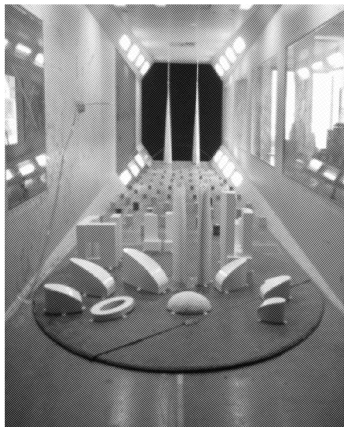
(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3



(d) Case4

图 5 试验工况介绍

型如图 2 所示。

风向角间隔取 15° , 共 24 个风向, 试验风向角定义如图 3 所示。

试验在模拟 C 类大气边界层风场中进行, 其平均风速剖面 and 湍流度剖面如图 4 所示。模型顶部高度处试验风速为 6.9m/s , 表面风压测量试验的采样频率为 312.5Hz , 采样时间为 28.8s , 对应于实际的 5.5Hz

和 27min 。为消除风压信号经过测压系统后的畸变影响^[11], 利用测压管路系统的传递函数对试验采集的风压数据进行了修正。

设定了 4 种试验模型模型工况, 依次增加影响因素来研究单一变量的影响, 如表 1 和图 5 所示。整体气动力的主要影响因素有 175m 高的超高层建筑姊妹外附网架, 比较 Case1 和 Case2 可以了解外附网架对

风洞试验模型工况 表 1

工况	工况描述	有无除姊妹楼外的周边建筑	有无姊妹楼	有无外附网架
Case1	孤立无网架工况	无	无	无
Case2	孤立有网架工况	无	无	有
Case3	简单周边有网架工况	无	有	有
Case4	完全周边有网架工况	有	有	有

目标建筑表面风压的影响;比较 Case2 和 Case3 可以了解姊妹楼对目标建筑表面风压的影响;比较 Case3 和 Case4 得到复杂环境对目标建筑表面风压的影响。

2 数据处理

本文给出的风压系数以测点高度处的来流风压为参考风压,计算式如下:

$$C_{p,i}(\theta, t) = \frac{P_i(\theta, t)}{0.5\rho U_H^2} \quad (1)$$

式中: $P_i(\theta, t)$, $C_{p,i}(\theta, t)$ 分别为风向角为 θ 时测点 i 处的风压及风压系数时程; ρ 为大气密度,取 1.25kg/m^3 ; U_H 为结构顶部高度处的来流平均风速; $\bar{C}_{p,i}(\theta)$, $\sigma_{cp,i}(\theta)$ 分别为风压系数的均值和均方根值。

测点上的峰值风压系数采用峰值因子法,计算式如下:

$$\hat{C}_{p,i}(\theta) = \bar{C}_{p,i}(\theta) + g\sigma_{cp,i}(\theta) \quad (2)$$

$$\check{C}_{p,i}(\theta) = \bar{C}_{p,i}(\theta) - g\sigma_{cp,i}(\theta) \quad (3)$$

式中: $\hat{C}_{p,i}(\theta)$, $\check{C}_{p,i}(\theta)$ 分别为风向角为 θ 时测点 i 处的风压系数极大值和极小值; g 为峰值因子,一般在 $2.5 \sim 4.0$ 之间取值,本文取 $3.5^{[12]}$ 。

用于围护结构设计的风压是各测点在所有风向角中的最不利风压,对应的最不利风压系数计算如下:

$$\hat{C}_{p,i_ext} = \max_{\theta=0 \sim 345} (\hat{C}_{p,i}(\theta)) \quad (4)$$

$$\check{C}_{p,i_ext} = \min_{\theta=0 \sim 345} (\check{C}_{p,i}(\theta)) \quad (5)$$

式中 $\hat{C}_{p,i_ext}$ 和 $\check{C}_{p,i_ext}$ 分别为测点 i 处的最不利正、负风压系数。

3 试验结果及分析

目标建筑横截面为带切角的椭圆形,切角立面外没有设置网架。曲面及测点位置示意如图 6 所示。

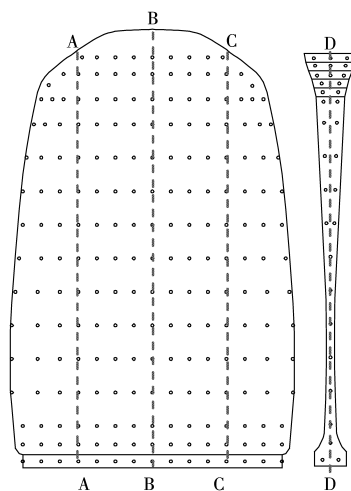


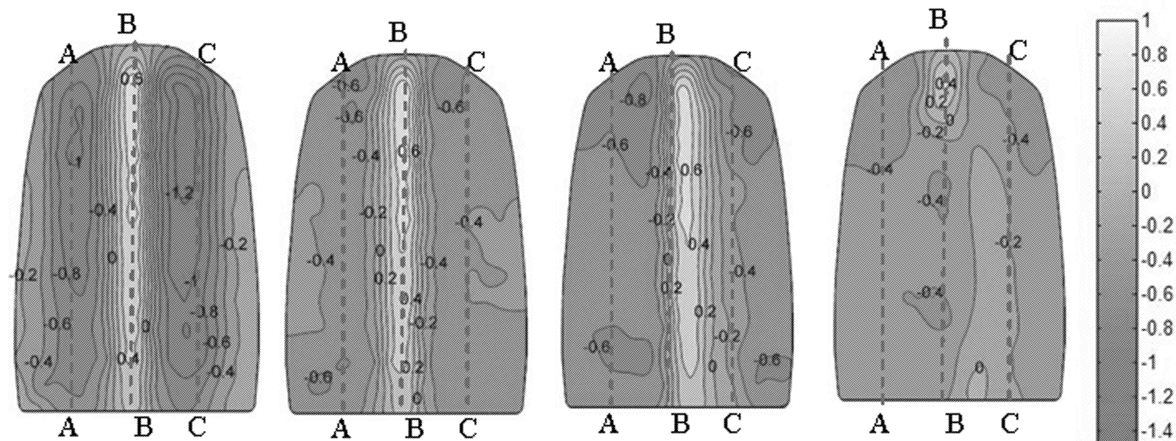
图 6 曲面及测点位置示意

3.1 平均风压系数

图 7~10 为典型风向角下四个模型工况的平均风压系数等值线。

(1) 外附网架的影响

从图 7~10 可以看出,迎风面(0° 风向角工况下 B-B 轴附近区域、 90° 风向角工况下的下 A-A 轴附近区域及 270° 风向角工况下的下 C-C 轴附近区域)上的平均风压系数受外附网架的影响很小,基本都在 $0.6 \sim 0.8$ 之间。来流平行于长轴时两侧面(0° 和 180° 风向角分别对应 A-A 轴和 C-C 轴附近区域, 270° 风向角对应 B-B 轴附近区域)的平均风压系数受外附网架的影响很大。无网架时(图 7(a) 和图 9(a))该区域负压绝



(a) 孤立无网架工况 Case1 (b) 孤立有网架工况 Case2 (c) 简单周边工况 Case3 (d) 完全周边工况 Case4

图 7 0° 风向角下四种工况的平均风压系数等值线

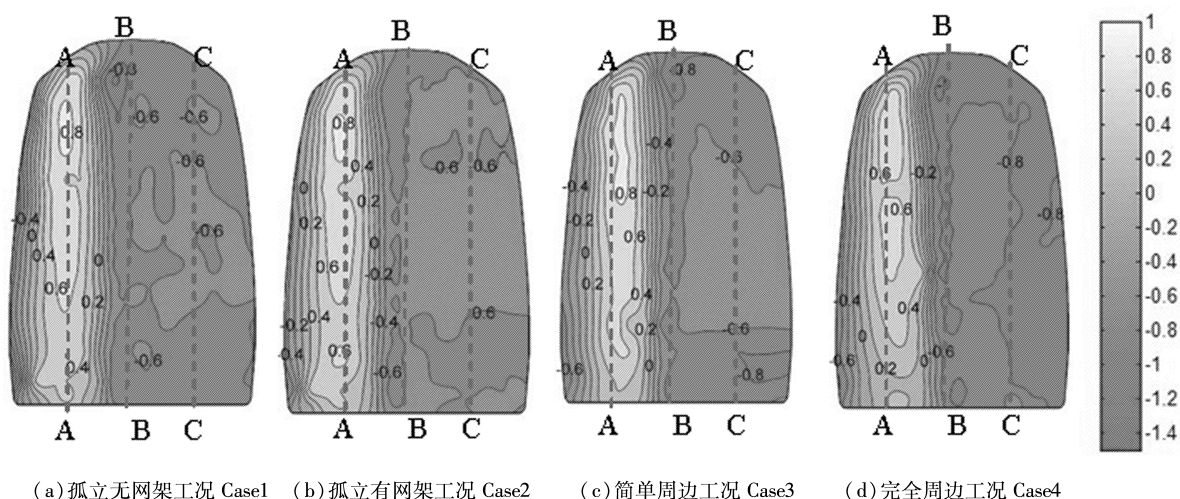


图8 90°风向角下四种工况的平均风压系数等值线

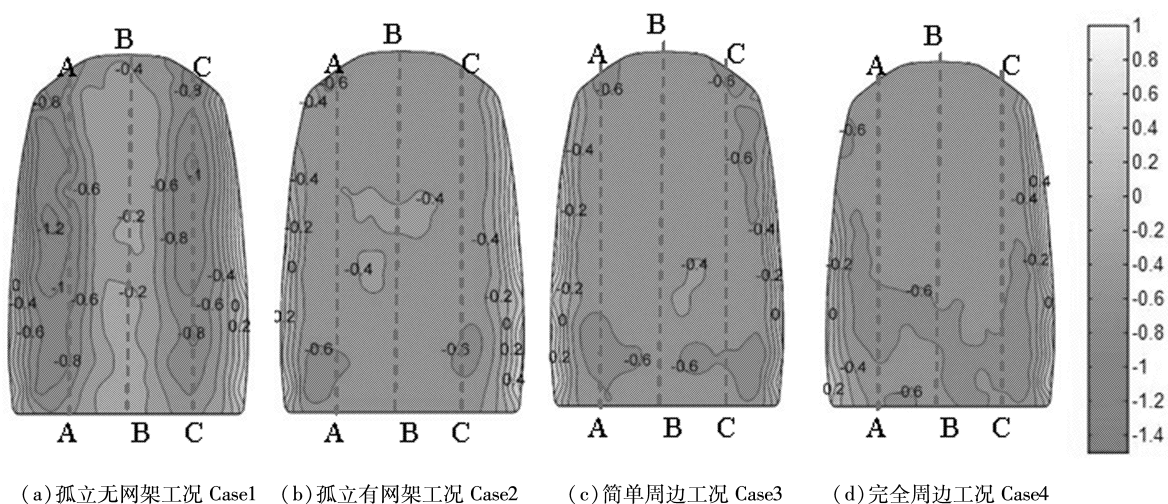


图9 180°风向角下四种工况的平均风压系数等值线

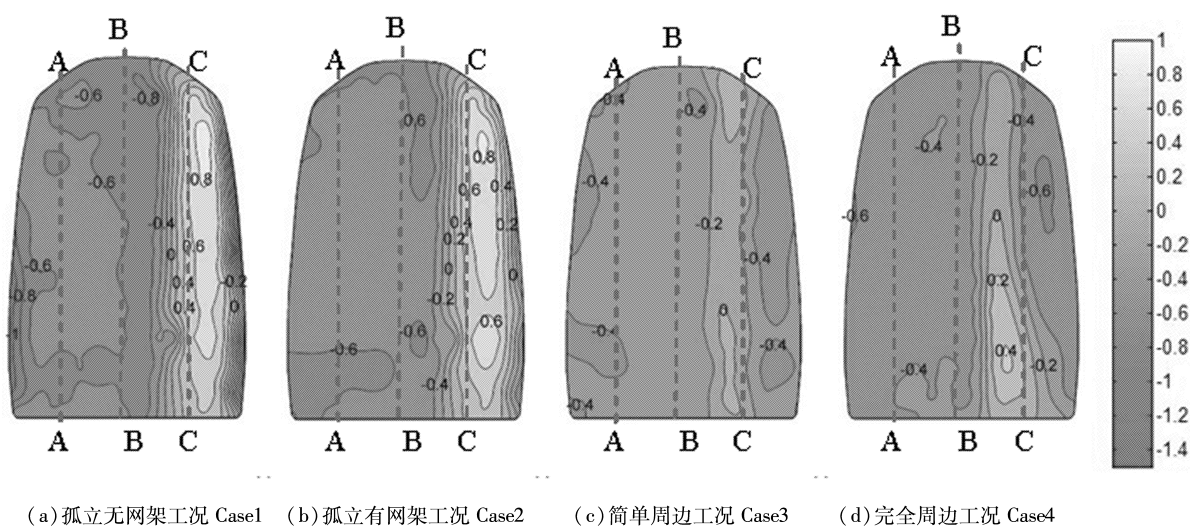


图10 240°风向角下四种工况的平均风压系数等值线

对值最大可达-1.2,而有网架时这些很高的平均负压被大幅度削弱,该区域的大部分数值下降到-0.5左右。但来流平行于短轴时(90°,270°风向角工况)侧面(B-B轴附近区域)的平均风压系数受外附网架

的影响却不明显。背风面(90°风向角下C-C轴附近区域和180°风向角下B-B轴附近区域)平均风压系数受外附网架的影响也很小。总之,外附网架的出现会降低目标建筑侧面上的平均负压绝对值,而对迎风面

上的平均正风压的影响很小。来流沿长轴方向和短轴方向吹向目标建筑时,平均负压绝对值的减小程度是不同的。产生这种现象的原因是外附网架削弱了来流在建筑物表面的分离强度,从而使因来流分离导致的侧面高负压减弱。

(2) 周边建筑的影响

0°风向角的 Case4 工况中,目标建筑受到上游高层建筑遮挡,在低于 175m 高度的迎风面(B-B 轴附近区域)上平均风压为负值,其值在 $-0.4 \sim -0.2$ 之间。240°风向角下的 Case3 和 Case4 工况中,由于姊妹楼的遮挡作用,目标建筑迎风面上的风压系数也为负值,其值在 $-0.6 \sim -0.4$ 之间,绝对值比 0°风向角下低于 175m 高度的迎风面 C-C 轴附近区域的还要大。表明干扰建筑离目标建筑越近,遮挡效应越明显,这与 Gowda B H L 等^[1]的研究结果相一致。比较 180°风向角下 Case2 和 Case3 可以知道,靠近并列布置的姊妹楼一侧的 C-C 轴区域的平均负风压系数的绝对值有所增加,很好地符合 Sakamoto H 等^[2]和 Taniike Y 等^[13]对穿堂风效应的叙述。

3.2 脉动风压系数

图 11~14 给出了在典型风向角下四种模型工况的风压系数均方根值等值线。

(1) 外附网架的影响

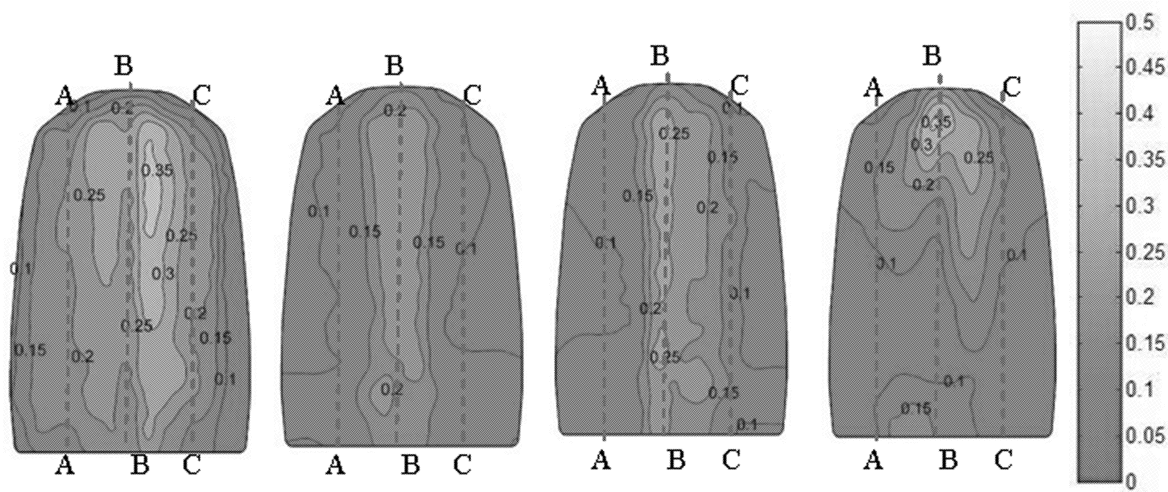
从图 11~14 中可以看出,外附网架使迎风面(0°风向角下 B-B 轴附近区域、90°风向角下 A-A 轴附近区域及 270°风向角工况下 C-C 轴附近区域)上的脉动风压系数略微减小。0°风向角工况下 B-B 轴附近区域工况 Case1 脉动风压系数基本在 $0.2 \sim 0.3$ 之间(图 11(a)),而工况 Case2 在 0.2 左右(图 11(b))。90°风向角下 A-A 轴附近区域,工况 Case1, Case2 脉动

风压系数都在 0.2 左右,外附网架的影响较为微弱。270°风向角工况下 C-C 轴附近区域上也有相同的现象。侧面(0°和 180°风向角工况下 A-A 轴、C-C 轴附近区域和 90°和 270°风向角工况下 B-B 轴附近区域)上的脉动风压系数受网架的抑制作用显著,工况的脉动风压系数基本在 $0.15 \sim 0.25$ 之间,而有网架工况则降低到 $0.10 \sim 0.15$ 之间。背风面(90°风向角工况下 C-C 轴附近区域,180°风向角工况下 B-B 轴附近区域及 270°风向角工况下 A-A 轴附近区域)脉动风压系数受网架的影响不明显,保持在 $0.1 \sim 0.15$ 区域附近。

可见,外附网架可以使迎风面脉动风压略微减小,但对侧面上较大的脉动风压产生更为明显的抑制作用。其原因可能是由于网架与主体结构距离较近,网架的遮挡作用尽管不能减小迎风面的平均风压,但会打碎来流气流中较大尺度的旋涡,因此减小了气流的脉动。在侧面,外附网架会扰乱横风向规则性旋涡脱落的形成,因此减小了横风向的脉动风压值。

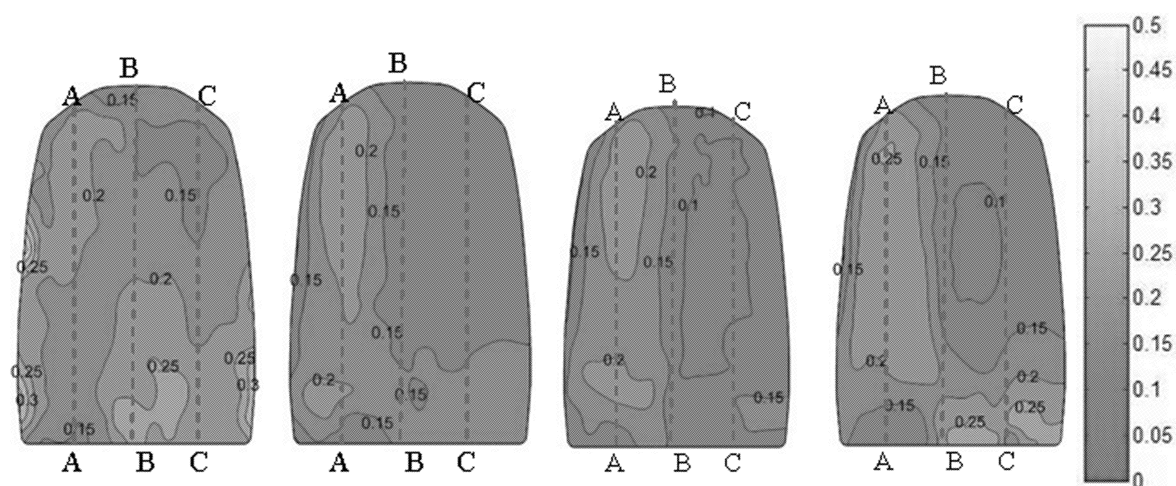
(2) 周边建筑的影响

比较 0°风向角下工况 Case3, Case4 可知,工况 Case4 中目标建筑高度低于 175m 的迎风面 B-B 附近区域的风压系数均方根值明显小于工况 Case3 中的,而高于 175m 高度的侧面(A-A, C-C 轴附近区域)上的风压系数均方根值由于受到上游 175m 超高高层建筑的尾流影响而有所增加。在 240°风向角下工况 Case3 和 Case4 中,相距很近的姊妹楼的遮挡使得目标建筑整个迎风面(尤其是 C-C 轴附近区域)风压系数均方根值相对于工况 Case2 都明显增加。这是由于目标建筑完全处于干扰建筑(姊妹楼)的边界剪切气流层内所造成的。



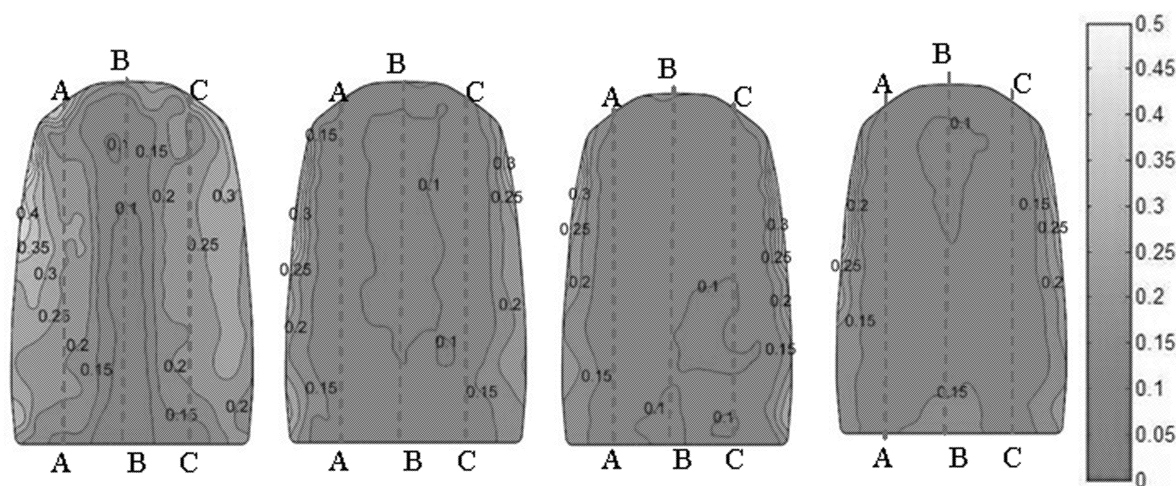
(a) 孤立无网架工况 Case1 (b) 孤立有网架工况 Case2 (c) 简单周边工况 Case3 (d) 完全周边工况 Case4

图 11 0°风向角下四种模型工况的风压系数均方根值等值线



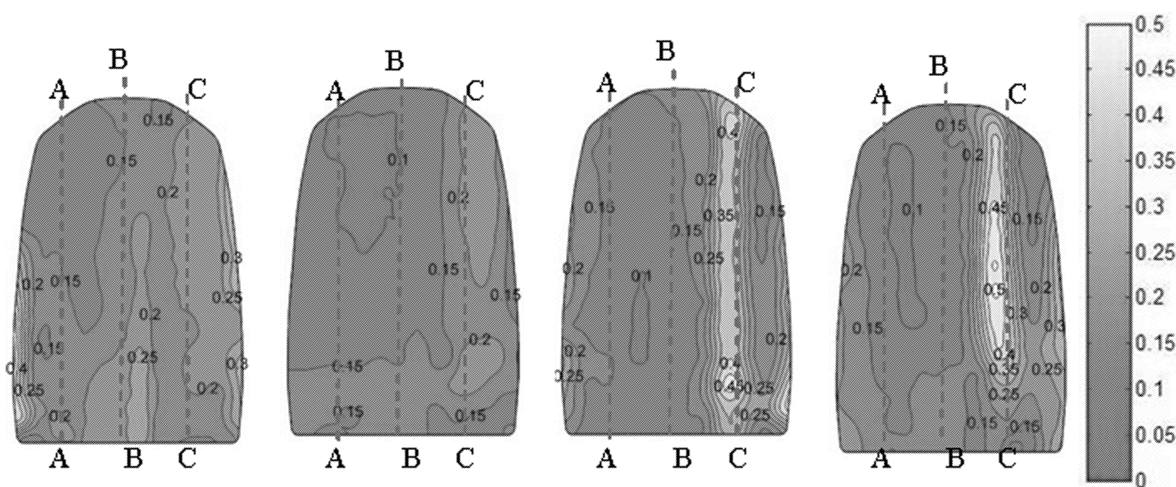
(a) 孤立无网架工况 Case1 (b) 孤立有网架工况 Case2 (c) 简单周边工况 Case3 (d) 完全周边工况 Case4

图 12 90°风向角下四种模型工况的风压系数均方根值等值线



(a) 孤立无网架工况 Case1 (b) 孤立有网架工况 Case2 (c) 简单周边工况 Case3 (d) 完全周边工况 Case4

图 13 180°风向角下四种模型工况的风压系数均方根值等值线



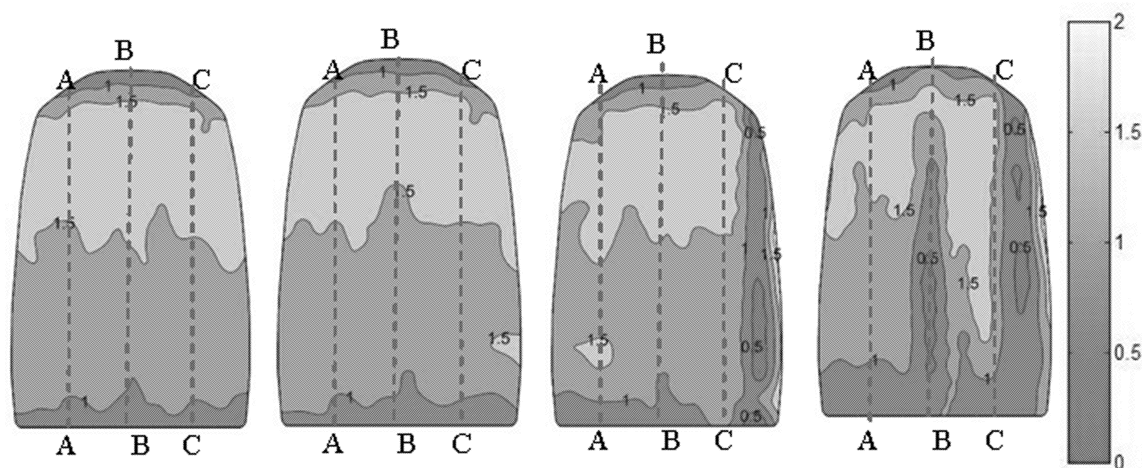
(a) 孤立无网架工况 Case1 (b) 孤立有网架工况 Case2 (c) 简单周边工况 Case3 (d) 完全周边工况 Case4

图 14 240°风向角下四种模型工况的风压系数均方根值等值线

3.3 最不利风压系数

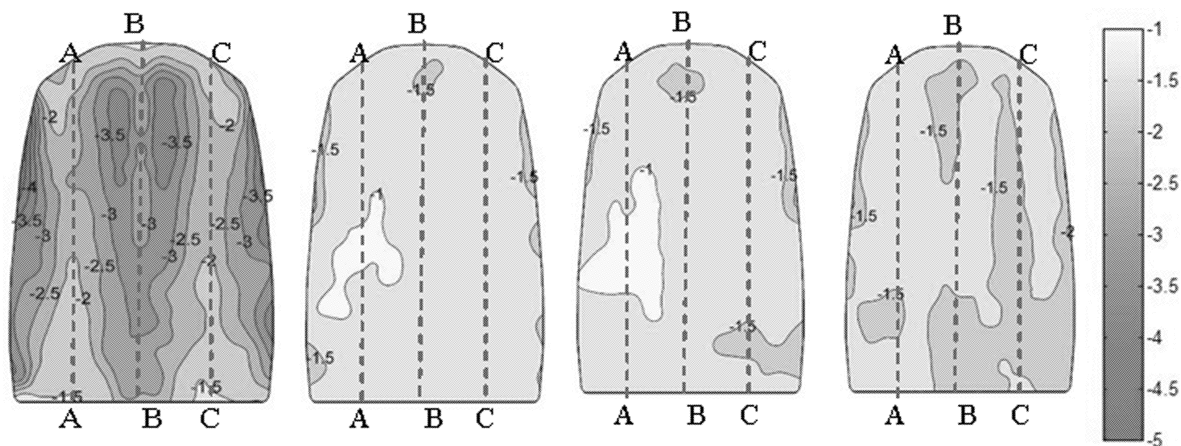
图 15,16 给出了四种工况下的最不利正、负风压

系数等值线。工况 Case4 中目标建筑的 B-B 轴和 C-C 轴区域上各有一块最不利正风压系数最小值区域,这



(a) 孤立无网架工况 Case1 (b) 孤立有网架工况 Case2 (c) 简单周边工况 Case3 (d) 完全周边工况 Case4

图 15 不同模型工况下的最不利正风压系数等值线



(a) 孤立无网架工况 Case1 (b) 孤立有网架工况 Case2 (c) 简单周边工况 Case3 (d) 完全周边工况 Case4

图 16 不同模型工况下的最不利负风压系数等值线

是由于 B-B 轴和 C-C 轴区域分别被姊妹楼和 175m 的超高层建筑遮挡而造成的, 工况 Case2 和 Case3 中上述区域随着干扰建筑的消失而消失也佐证了这一点, 表明目标建筑上受周边建筑遮挡的区域的最不利正风压系数明显小于未受遮挡的区域, 也就说最不利正风压系数的最小值是由周边建筑的遮挡效应决定的。

结合上述分析可知, 外附网架对目标建筑迎风面上的风压系数均值和脉动值影响较小, 所以工况 Case1, Case2 中结构表面最不利正风压系数非常接近; 同时外附网架会大幅降低目标建筑相应的侧面上平均负压的绝对值以及风压脉动值, 因此工况 Case2 中整个表面上的最不利负风压系数的绝对值均明显小于工况 Case1。尤其是目标建筑 B-B 轴区域和 D-D 轴区域, Case2 中最不利负风压系数在 $-2 \sim -1$ 之间变化, 而 Case1 最不利负风压系数在 $-4 \sim -3$ 之间变化。表明外附网架对大曲率曲面的最不利负风压系数的改善效果优于小曲率曲面。

4 结论

基于一栋外附网架的超高层建筑的刚性模型的表面风压测量试验, 对风压系数均值和均方根值、最不利正、负风压系数进行分析, 得到如下结论:

(1) 外附网架的存在会明显降低目标建筑表面上所有区域的最不利负风压系数, 降低幅度可达 50% ~ 67%, 其中椭圆短轴区域 B-B 轴区域以及椭圆切角区域 D-D 轴区域的增幅更为明显。但对最不利正风压系数影响不大。

(2) 外附网架会大幅降低目标建筑侧面上的风压系数均值的绝对值和均方根值, 而对迎风面上的风压系数均值和均方根值影响较小。

(3) 上游干扰建筑会使目标建筑表面受遮挡区域的最不利正风压系数明显降低, 下降幅度有可能超过 50%; 同时上游干扰建筑的尾流有可能使目标建筑侧面的最不利负风压系数绝对值增加, 增幅可达 20%, 甚至可达到 40%。干扰建筑距离目标建筑越近, 遮挡

效应越明显。

(4)需要说明的是,本文结果与建筑平面特征及周边建筑相对位置有关,本文结论不一定适用于与本文目标建筑外形差异较大的情况。

参 考 文 献

- [1] GOWDA B H L, SITHEEQ M M. Interference effects on the wind pressure distribution on prismatic bodies in tandem arrangement [J]. Industrial Journal of Technology, 1993,31 :485-495.
- [2] SAKAMOTO H, HANIU H. Aerodynamic forces acting on two square prisms placed vertically in a turbulent boundary layer [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998,31 :41-66.
- [3] SYKES D M. Interference effects on the response of a tall building model [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983,11 :365-380.
- [4] ENGLISH E C. Shielding factors from wind-tunnel studies of prismatic structures [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990,36 :611-619.
- [5] SAUNDERS J W, MELBOURNE W H. Buffeting effects of upstream buildings [C]//Proceedings of 5th International Conference on Wind Engineering. Fort Collins, USA, Pergamon,1980.
- [6] KWOK K C S. Effect of building shape on wind-induced response of tall building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988,28 :381-390.
- [7] KIM Y M, YOU K P. The evaluation of wind-induced vibration responses to a tapered tall building [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2008,17 :655-667.
- [8] PETER A IRWIN. Bluff body aerodynamics in wind engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008,96(6-7) :701-712.
- [9] PETER A IRWIN. Wind engineering challenges of the new generation of super-tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009,97(7-8) :328-334.
- [10] KAWAI H. Effect of corner modifications on aeroelastic instabilities of tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998,74-76 :719-729.
- [11] 黄鹏,全涌,顾明. TJ-2 风洞大气边界层被动模拟方法的研究 [J]. 同济大学学报, 1999,27(2) :136-140.
- [12] DAVENPORT A G. Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading [C]//Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1964 :187-196.
- [13] TANIKE Y, INAKA H. Aeroelastic behavior of tall buildings in wakes [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988,28 :317-327.