

拟建高大建筑对邻近建筑整体风荷载的影响

陈嘉路, 全涌, 顾明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于一栋既有高层建筑的刚性模型测压风洞试验, 讨论了邻近更高大的拟建超高层建筑及周边其他建筑对其整体风荷载的干扰效应。试验结果表明, 当拟建超高层建筑处在上游时, 遮挡效应一般会减小下游既有建筑的顺风向气动压力平均值, 但尾流旋涡脱落现象会导致下游既有建筑的横风向风荷载峰值显著增大, 这可能使得下游既有建筑的原始结构设计偏于危险。

关键词: 整体风荷载; 干扰效应; 超高层建筑; 旋涡脱落

中图分类号: TU973.213

文献标志码: A

Effects of A Super-high-rise Building on Wind Loads of An Adjacent Building

CHEN Jialu, QUAN Yong, GU Ming

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on a series of wind tunnel tests conducted on the rigid model of an actual high-rise building, wind dynamic interference effects on the target building of the proposed super high-rise building and other surrounding buildings were investigated. The results show that upon completion of the proposed building upstream, the shielding effect of it will generally reduce the along-wind mean aerodynamic force of the existing buildings downstream. However, the vortex shedding in its wake may lead to a significant increase in the across-wind peak wind load of the existing buildings downstream, which means that these downstream buildings under the original structural design may no longer be safe.

Key words: wind load; interference effects; super high-rise building; vortex shedding

随着城市化的不断推进,建筑向着更高更柔更密集的方向发展,风荷载逐渐成为高层建筑结构设计时需要考虑的主要荷载之一,甚至控制性荷载。在

大城市中,高层建筑之间的距离一般不会很大,气动干扰效应相当复杂。早在 20 世纪 8、90 年代, Sakamoto^[1]、Taniike^[2]和 Khanduri^[3]等最早对高层建筑间的气动干扰效应展开研究。在此后三十多年里,越来越多的学者开始从事建筑间气动干扰领域的研究,并作出了一系列研究贡献。Xie^[4]和 Gu^[5]等通过一系列详细的风洞试验,研究了两栋和三栋高层建筑之间的风致干扰效应,并分别定性讨论了遮挡效应和狭缝效应的影响。Xie 等^[6]对三幢高层建筑的平均干扰效应进行了进一步研究,提出了描述动态干扰效应的包络干扰因子(EIF)。Lam 等^[7]研究了连续 5 个近距离平行布置的一排高层建筑之间的风致干扰效应,并解释了这种布置下的一些特有的气动干扰机制。之后, Lam 等^[8]进一步研究了近距离平行以及菱形排列的 5 个高层建筑的风致干扰效应,对建筑平均和脉动风荷载进行测量,并对建筑物风振动力响应进行估计。Kim 等^[9]研究了风向、施扰建筑的相对高度和相对位置等干扰因素对目标建筑的局部峰值风压的干扰作用,之后 Kim 等^[10]进一步研究了两幢建筑间的风致干扰对整体风荷载的影响。还有很多学者对不同形状及布置形式的两栋高层建筑之间的各类气动干扰效应做过研究^[11-14]。

虽然人们对建筑间气动干扰效应的研究已经有很多,但一般仅考虑相对简单的情况,如施扰建筑和受扰建筑均为规则的方形截面,周边建筑排布整齐(如直线排列、斜向排列、L 形排列等),施扰建筑的横截面大小与受扰建筑相当,等等。而大城市随机密集城区对目标建筑的影响,尚未得到深入的研究。在新建一栋高大建筑时,周边建筑对拟建建筑的影响往往能够得到人们的足够重视,但拟建高大建筑对邻近相对低矮的高层建筑可能会有更严重的影响,却常常被人们忽视。

本文基于一栋高 150 m 左右的实际超高层建筑

收稿日期: 2018-09-07

基金项目: 自然科学基金面上项目(51778493)

第一作者: 陈嘉路(1994—),男,博士生,主要研究方向为超高层建筑的气动特性及干扰效应, E-mail: 1610201@tongji.edu.cn

通信作者: 全涌(1971—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为建筑结构抗风, E-mail: quanyong@tongji.edu.cn

的刚性模型测压风洞试验,分析了其邻近更加高大(高度约 400 m)的大型超高层建筑、等高的姊妹楼建筑和其他相对低矮的背景建筑群对其风荷载的影响。

1 目标建筑及周边建筑概况

目标建筑为一栋高 150 m 的实际超高层建筑,宽度和厚度分别为 38 m 和 23 m 左右,横截面形状沿高度无变化。图 1 为其风洞试验测压刚性模型的测点布置示意图。模型外表面共布置了 210 个测点,分 10 层布置,每层 21 个测点。

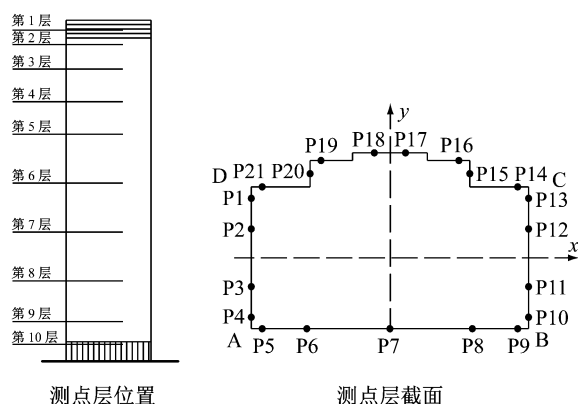


图 1 测点层位置示意

Fig.1 Positions of measurement points

周边干扰建筑信息如图 2 所示,模型试验模拟的建筑场地范围是半径为 750 m 的圆形区域。目标建筑 +y 轴方向约 170 m 处是一栋高度约 400 m 的

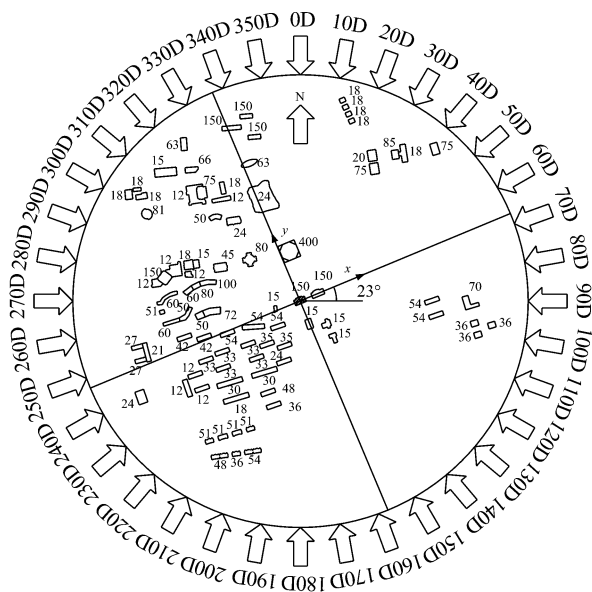


图 2 周边建筑及风向角信息(单位:m)

Fig.2 Surrounding buildings and wind directions(unit:m)

拟建大型超高层建筑(下文简称“大高楼”),其横截面基本形状为边长 57 m 的有斜切角的正方形;目标建筑 +x 轴方向有一栋高度与目标建筑相同,横截面形状与目标建筑相似的姊妹建筑(下文简称“姊妹楼”),它与目标建筑平行布置,间隔 23 m;其他周边建筑(下文简称“背景建筑群”)大多比目标建筑低矮,分布情况总体表现为东半侧(+x 方向)稀疏西半侧(-x 方向)密集;北侧及西侧的背景建筑相对偏高,高度多数集中在 20~50 m 之间,个别建筑高度也达到了 100 m;在 +y 轴方向较远处(距离 550 m 左右),还有 3 栋背景建筑与目标建筑等高。

风洞试验以正北方向定义为 0° 风向角,正东方向定义为 90° 风向角,以每 10° 取一个试验工况,共计 36 个试验风向工况。目标建筑体轴 Y 方向与地理北方向呈 23° 夹角。

2 试验概况

在同济大学 TJ-2 大气边界层风洞中进行了风洞试验。该风洞试验段高 2.5 m,宽 3.0 m。风洞试验在模拟 D 类风场中进行,几何缩尺比取 $1/500$,全部建筑模型对试验段横截面的阻塞比在 5% 左右。模型顶部高度处的试验风速为 $11.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。相对于建设场地 50 年重现期基本风压 0.75 Kpa,该试验的风速和时间缩尺比分别为 $1:3.6$ 和 $1:140$ 。图 3 为试验中模拟的平均风速和紊流度剖面与建筑结构荷载规范中 D 类地貌值的对比,其中 U 为各高度处风速; U_{ref} 为 110 cm 高度处的风速。

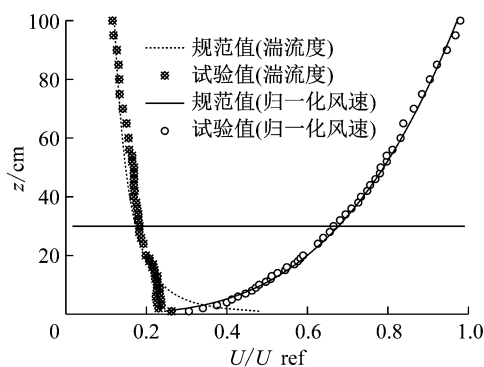


图 3 风场模拟结果

Fig.3 Parameters of the simulated wind field

为了更好地研究周边建筑对目标建筑的影响,试验设置了 5 个工况,如表 1 和图 4 所示。其中,工况 1 为孤立工况,周边无任何建筑;工况 2 的周边仅有姊妹楼一栋建筑;工况 3 的周边只有姊妹楼和大高楼两栋建筑;工况 4 的周边有姊妹楼和背景建筑

群,无大高楼;工况 5 有全部周边建筑,包括大高楼、姊妹楼和背景建筑群。

表 1 工况说明

Tab.1 Explanation of test cases

工况号	姊妹楼	大高楼	背景建筑	工况描述
工况 1	无	无	无	孤立工况
工况 2	有	无	无	仅有姊妹楼
工况 3	有	有	无	姊妹楼 & 拟建大高楼
工况 4	有	无	有	姊妹楼 & 背景建筑
工况 5	有	有	有	姊妹楼 & 拟建大高楼 & 背景建筑

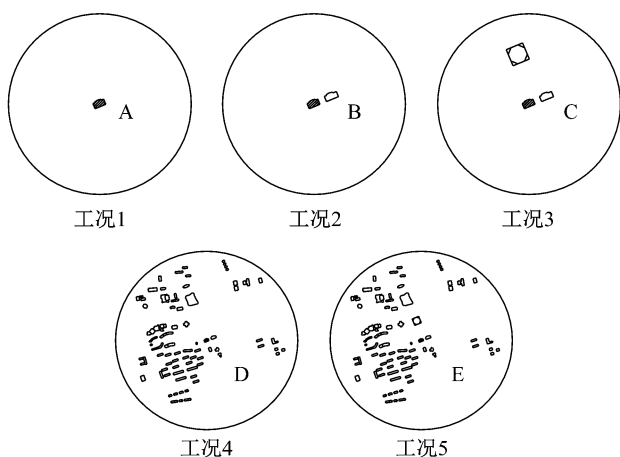


图 4 各工况平面示意

Fig.4 Layout of surrounding buildings under each test case

3 数据处理

基于测压试验得出的测点风压数据,通过空间积分可得到每个风向角下目标建筑模型基底气动力 6 分量(Q_x, Q_y, Q_z, M_x, M_y 和 T_z)时程信息,其中竖向分力 Q_z 和气动基底扭矩 T_z 并非本文所关心的内容,故只考虑剩下的 4 个分量. 本文选择具有代表性的 x 轴和 y 轴方向的侧弯模态广义力系数 C_{Fx} 和 C_{Fy} (分别与绕建筑 y 轴和 x 轴的基底弯矩系数相当)分析建筑整体结构的受力状况. 广义气动力系数定义为 $C_F(\theta, t) = M(\theta, t) / (0.5\rho_a U_H^2 B_a H^2)$, 其中, H, B_a 和 U_H 分别为建筑的高度、迎风宽度和建筑高度处的来流平均风速; $M(\theta, t)$ 为风向角为 θ 时的基底弯矩时程; ρ_a 为空气密度. 不考虑建筑振动的 x 轴和 y 轴向的广义气动力系数均值和脉动值(均方根值)分别用 $C_{Fx_mean}(\theta), C_{Fx_rms}(\theta), C_{Fy_mean}(\theta)$ 和 $C_{Fy_rms}(\theta)$ 表示. 考虑建筑振动后的 x 轴和 y 轴向风荷载系数脉动值分别用 $C_{Fx_rms'}(\theta)$ 和 $C_{Fy_rms'}(\theta)$ 表示. 气动力系数功率谱表示量纲为一时折算功率谱形式 $S_{C_F}^*(\theta,$

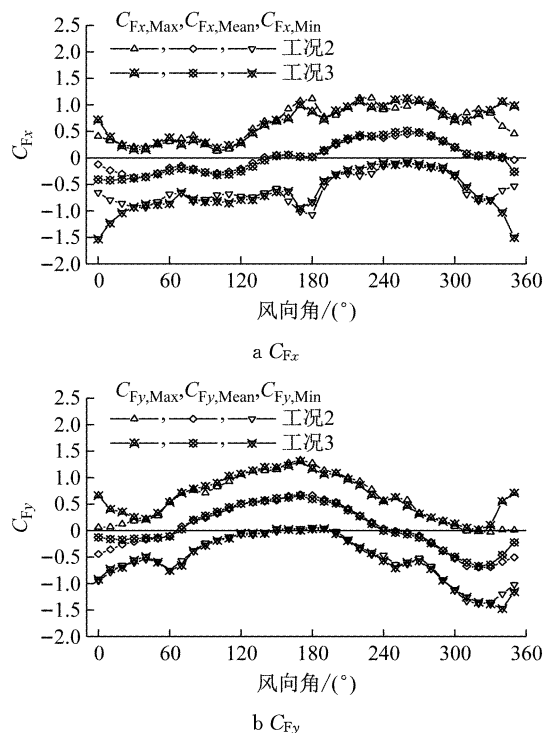
$f) = f S_M(\theta, f) / (0.5\rho_a U_H^2 B_a H^2)^2$, 其中, $S_M(\theta, f)$ 为风向角为 θ 下的基底弯矩响应功率谱. 最大与最小风荷载系数分别定义为 $C_{F_max}(\theta) = C_{F_mean}(\theta) + g C_{F_rms'}(\theta)$ 和 $C_{F_min}(\theta) = C_{F_mean}(\theta) - g C_{F_rms'}(\theta)$. 其中, 峰值因子 $g = \sqrt{2 \ln(\nu \cdot T)} + 0.5772 / \sqrt{2 \ln(\nu \cdot T)}$, $\nu \cdot T$ 为原型时间 10 min 时距内 $C_F(\theta, t)$ 向上穿越其均值的次数. 风荷载峰值 $C_{F_peak}(\theta)$ 取 $C_{F_max}(\theta)$ 和 $C_{F_min}(\theta)$ 绝对值的最大值.

4 实验结果

基于上述方法计算得到的各工况下的风荷载系数,可分析各周边建筑的影响.

4.1 拟建大高楼的影响

图 5a 和 5b 分别给出目标建筑在工况 2 和工况 3 下 C_{Fx} 和 C_{Fy} 随风向角变化的情况. 通过比较可以发现,在风向角 350° 附近,目标建筑受拟建大高楼的影响最为突出. 相比于“既没有大高楼也没有背景建筑群”的工况 2,工况 3 中新增的大高楼使得目标建筑 x 轴向和 y 轴向的峰值风荷载都有所增大,且 x 轴向峰值风荷载增大的幅度更加显著.

图 5 工况 2 和工况 3 的 C_F 统计值对比Fig.5 The comparison of C_F between Case 2 & Case 3

为了解释这一现象,图 6 给出了目标建筑在工况 2 和工况 3 下 C_{Fx_rms} 和 C_{Fy_rms} 随风向角变化的曲线图. 可以观察到在 350° 风向角,顺风向 C_{Fy_rms} 受拟

建大高楼影响增大了约 41%，而横风向 C_{Fx_rms} 的增幅甚至达到了 105%。

350°风向角附近，目标建筑脉动气动力的增大与上游拟建大高楼的尾流旋涡脱落有关。在 350°风向角附近，大高楼正好处于目标建筑上游，来流经过大高楼后会发生旋涡脱落现象，尾流中相互交替的旋涡会极大地激励下游建筑的横风向气动力，使其横风向气动力脉动值显著增大。顺风向气动力的脉动值也会受到上游大高楼的干扰，但不会有横风向显著，这与图 6 中的分析结果一致。

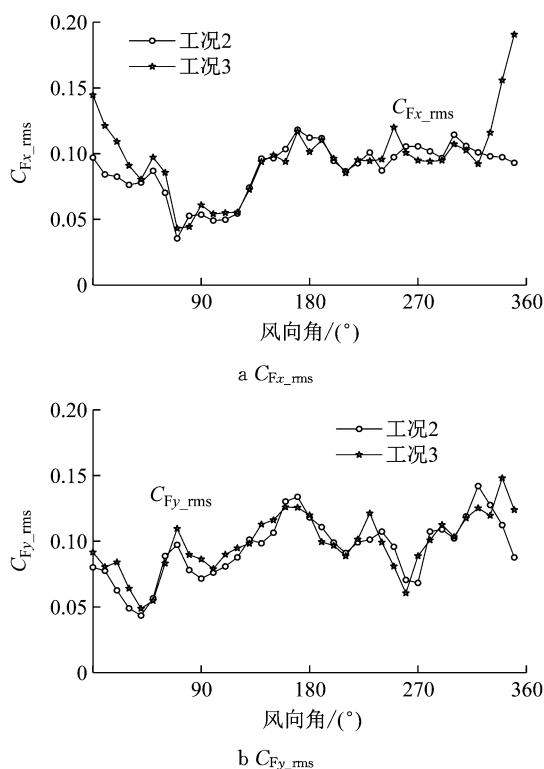


图 6 工况 2 和工况 3 的 C_{Fx_rms} 和 C_{Fy_rms} 值随风向角变化
Fig. 6 C_{F_rms} of Case 2 & Case 3 versus wind angles

图 7 给出目标建筑在 350°风向角下 x 轴和 y 轴向的气动力系数功率谱。观察发现，不论是 S_{Fx}^* 还是 S_{Fy}^* ，工况 3 中功率谱的能量在关注的频率范围都比工况 2 中要大很多，甚至在某些频率点出现了明显的谱峰，这与拟建大高楼对来流的干扰以及尾流旋涡脱落的频率有一定关系。

撇开拟建大高楼对目标建筑气动力脉动值的影响，考查图 5a 和 5b 中各工况的气动力系数平均值，可以发现在 350°附近风向角，由于拟建大高楼的遮挡作用使得气流的方向发生一定变化，原本接近 0 值的 C_{Fx_mean} 显著偏离 0 值附近，并使得原本绝对值较大的 C_{Fy_mean} 却明显减小。可见，当拟建大高楼相对目标建筑处在来流上游时，它的遮挡效应以及尾流

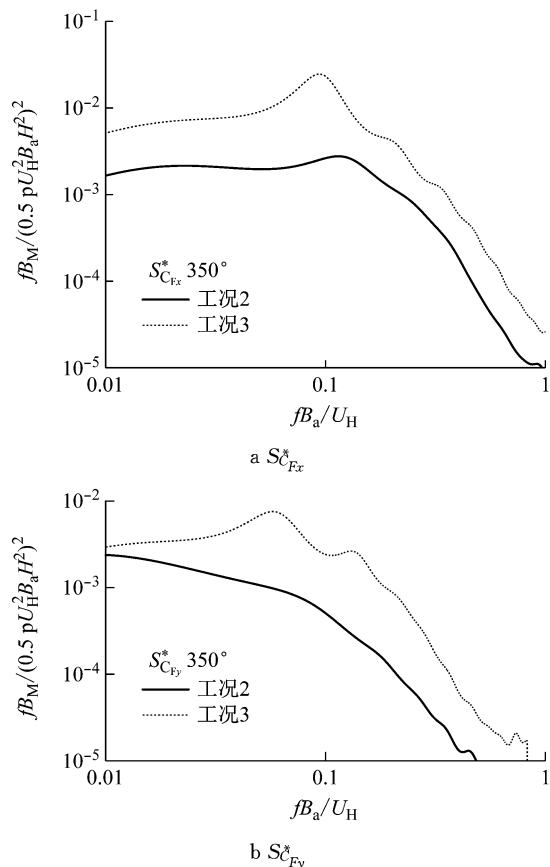


图 7 工况 2 和工况 3 在 350°风向角下的 S_{Fx}^*

Fig. 7 S_{Fx}^* of Case 2 & Case 3 at a wind angle of 350°

旋涡脱落，会使得目标建筑横风向气动力平均值显著增大的同时，顺风向气动力平均值明显减小。

为了进一步研究在实际情况下拟建大高楼对目标建筑风荷载的影响，图 8 和图 9 分别给出了在工况 4 和工况 5 中目标建筑 C_{Fx} 和 C_{Fy} 随风向角变化情况。其中工况 5 为全部干扰建筑均存在的工况，而工况 4 相比工况 5 去掉了拟建大高楼。与前文中理想状态下的“工况 2 和工况 3”不同，“工况 4 和工况 5”的对比研究是在有背景建筑群干扰的前提下进行的，以反映目标建筑在实际情况下的受扰情况。

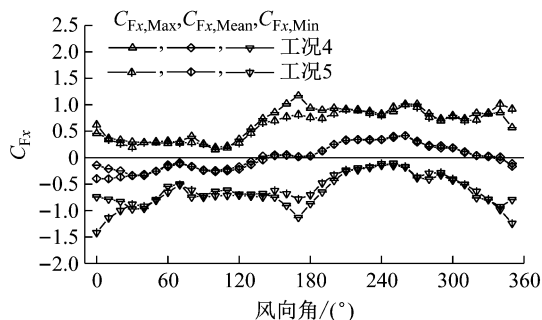


图 8 工况 4 和工况 5 的 C_{Fx} 统计值对比
Fig. 8 The comparison of C_{Fx} between Case 4 & Case 5

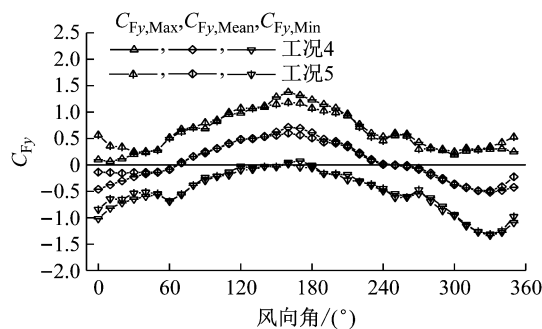


图 9 工况 4 和工况 5 的 C_{Fy} 统计值对比
Fig.9 The comparison of C_{Fy} between Case 4 & Case 5

通过对比工况 4 与工况 5,发现在 350° 风向角附近有与工况 3 相对于工况 2 一致的变化规律:在 x 轴方向,目标建筑 C_{Fx_mean} 的绝对值和 C_{Fx_rms} 都由于拟建大高楼的尾流旋涡脱落的影响而显著增大,最终导致目标建筑 C_{Fx_peak} 增大,使得其控制值(所有风向下 C_{Fx_peak} 的最不利值)增大了 10% 左右;在 y 轴方向,目标建筑的 C_{Fy_rms} 也会受大高楼尾流旋涡脱落的影响而有所上升,同时由于拟建大高楼的遮挡效应,目标建筑的 C_{Fy_mean} 绝对值会下降。

此外,仔细观察图 8 还可以发现在 170° 风向角附近,目标建筑的 C_{Fx_peak} 受拟建大高楼的影响而显著降低。反观图 5a,虽不如图 8 明显,但在 180° 风向角附近也能观察到的类似情况,即目标建筑 C_{Fx_peak} 被背风面的拟建大高楼削弱。为了解释这一情况,图 10 和图 11 分别给出了上述两种情况下目标建筑的 x 轴向气动力系数功率谱 $S_{C_{Fx}}^*$ 。通过观察发现,两功率谱图中均可以看出目标建筑的横风向气动力系数均方根值会由于拟建大高楼的干扰而有所降低,图 10 中目标建筑受拟建大高楼影响较图 11 更为明显。

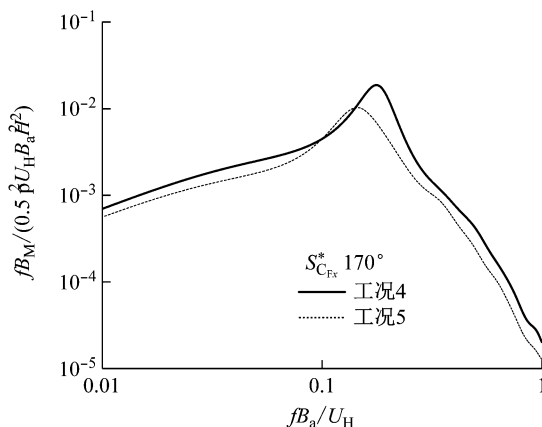


图 10 工况 4 和工况 5 在 170° 风向角下的 $S_{C_{Fx}}^*$
Fig.10 $S_{C_{Fx}}^*$ of Case 4 & Case 5 at a wind angle of 170°

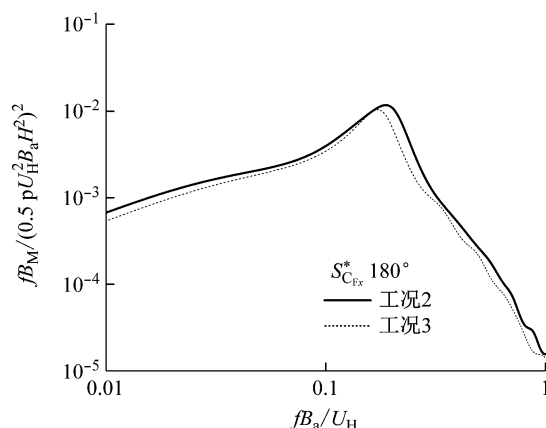


图 11 工况 2 和工况 3 在 180° 风向角下的 $S_{C_{Fx}}^*$
Fig.11 $S_{C_{Fx}}^*$ of Case 2 & Case 3 at a wind angle of 180°

可见,拟建的大高楼对目标建筑风荷载的影响并非仅发生在其位于目标建筑上游时,当拟建大高楼相对于目标建筑处在来流下游时,它会一定程度上削弱目标建筑的横风向脉动气动力,且不同于理想状态,在实际城市中目标建筑的周边有众多低矮建筑存在,下游拟建大高楼的影响可能更为显著。

综上所述,当拟建大高楼处在目标建筑上游时,其遮挡效应会减小目标建筑的顺风向气动力平均值,其尾流旋涡脱落现象将增大目标建筑顺风向和横风向的气动力脉动值,最终可能会导致目标建筑横风向的风荷载峰值显著增大;拟建大高楼处在目标建筑下游时,它会一定程度上削弱目标建筑横风向脉动气动力,且背景建筑群的出现不但不会改变大高楼对目标建筑的影响规律,可能还会使得下游拟建大高楼的影响更为显著。

4.2 等高姊妹楼的影响

图 12 和图 13 分别为目标建筑在工况 1 和工况 2 下 C_{Fx} 和 C_{Fy} 随风向角变化情况。工况 2 在工况 1 基础上仅仅新增了等高的姊妹楼。

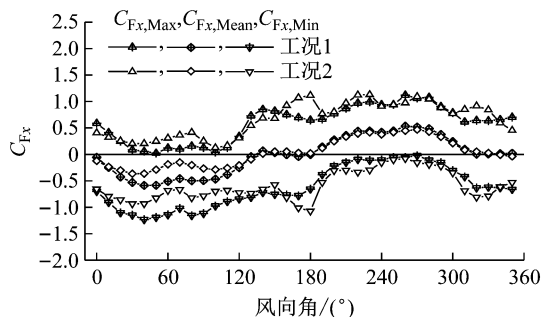
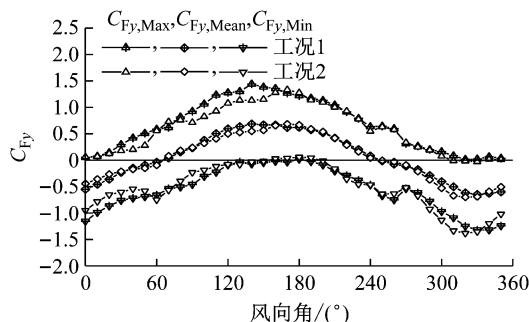


图 12 工况 1 和工况 2 的 C_{Fx} 统计值对比
Fig.12 The comparison of C_{Fx} between Case 1 & Case 2

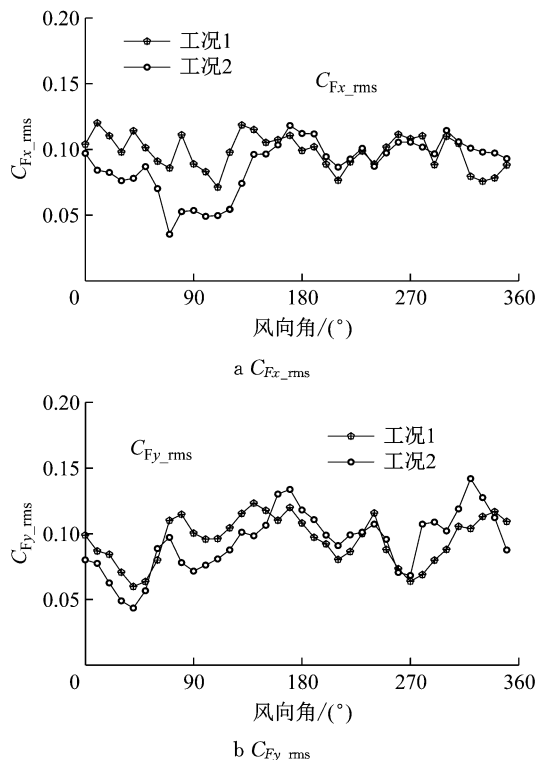
图 13 工况 1 和工况 2 的 C_{Fy} 统计值对比Fig. 13 The comparison of C_{Fy} between Case 1 & Case 2

就平均气动力而言,等规模姊妹楼的影响主要体现在对目标建筑 C_{Fx_mean} 的影响上,而对目标建筑 C_{Fy_mean} 的影响很小.从工况 2 与工况 1 的差异可以看出,在风向角为 $20^\circ \sim 120^\circ$ 时,目标建筑的 C_{Fx_mean} 绝对值受姊妹楼干扰显著.其中,在 40° 风向角附近,目标建筑 C_{Fx_mean} 的绝对值因姊妹楼影响减小了约 38%,而在风向角为 70° 附近(姊妹楼位于目标建筑正上游方向)时,姊妹楼对目标建筑的影响最大,它使目标建筑 C_{Fx_mean} 的绝对值减小了约 67%.

就峰值风荷载而言,观察图 12 和图 13 可以发现,从 $0^\circ \sim 140^\circ$ 风向角附近,目标建筑的 x 轴和 y 轴向的风荷载峰值均会由于新增姊妹楼的影响而有所降低.为了解释这种现象,图 14 给出了目标建筑在工况 1 和工况 2 下, C_{Fx_rms} 和 C_{Fy_rms} 随风向角变化的曲线图.

通过比较图 14 中工况 1 与工况 2 的差异可知,等高姊妹楼对目标建筑脉动气动力的影响从 0° 风向角开始,一直到 140° 风向角结束.这期间目标建筑的 C_{Fx_peak} 和 C_{Fy_peak} 均会受姊妹楼干扰而有所降低.风向角在 70° 左右时,姊妹楼处在目标建筑正上游,对目标建筑 C_{Fx_peak} 的影响最为显著,使之从 0.86 降低到 0.35,减小了约 60%.

可见,当等高的姊妹楼处在来流上游时,它不但会使目标建筑顺风向的平均和脉动气动力都显著降低,同时还会使其横风向脉动气动力也有所下降,这主要是由于姊妹楼与目标建筑距离非常近,遮挡效应十分显著.目标建筑迎风面在被上游姊妹楼遮挡的情况下,减小了来流的直接作用,迎风面的风压不论是平均值还是脉动值均显著降低,而其背风面的风压变化不大,故其顺风向不论是平均气动力还是脉动气动力均会显著下降.同时,来流在姊妹楼迎风面发生分离,尽管在姊妹楼自身的侧风面迎风边缘附近的风压脉动值会很大,但当气流从姊妹楼迎风边缘沿其侧立面流向背风边缘时,其风压脉动值不

图 14 工况 1 和工况 2 的 C_{Fx_rms} 和 C_{Fy_rms} 值随风向角变化图Fig. 14 C_{F_rms} of Case 1 & Case 2 versus wind angles

断减小并逐渐趋于稳定,等到达目标建筑侧立面时风压脉动值远小于没有姊妹楼的情况.

仔细观察图 12 还可以发现,相对于工况 1 而言,新增姊妹楼后的工况 2 中 C_{Fx_peak} 在 $160^\circ \sim 190^\circ$ 风向角之间明显增大,相同的情况还可在 $300^\circ \sim 340^\circ$ 风向角之间观察到.这表明,当姊妹楼相对于来流处在目标建筑一侧时,会增大目标建筑的横风向峰值风荷载,这是由于狭管效应导致目标建筑与姊妹楼之间的气流流速显著增大导致的.

图 15 给出了目标建筑在 70° 和 180° 风向角下 x 轴向的气动力系数功率谱 $S_{C_{Fx}}^*$.图中可观察到,在 70° 风向角下, $S_{C_{Fx}}^*$ 低频段的能量在工况 2 中的值小于在工况 1 中的值,而在高频段工况 2 中的值稍大于工况 1 中的值,这是由于低频段能量来源于来流紊流,受姊妹楼的遮挡后不能直接作用于目标建筑,而高频段能力的增大来源于姊妹楼的尾流脉动.最终导致工况 2 中功率谱曲线函数对频率的积分值 $\int_0^\infty S_{C_{Fx}}^*(f) \cdot df$ 显然不及孤立工况工况 1 中的大.此外,在 180° 风向角时,能观察到工况 2 中的 $\int_0^\infty S_{C_{Fx}}^*(f) \cdot df$ 会大于工况 1 中的值.这表明在 70° 风向角时目标建筑的 C_{Fx_rms} 会由于姊妹楼的遮挡效应而显著降低,而在 180° 风向角时会受姊妹楼的干

扰而有所增大,这与前面所分析的结果相一致。

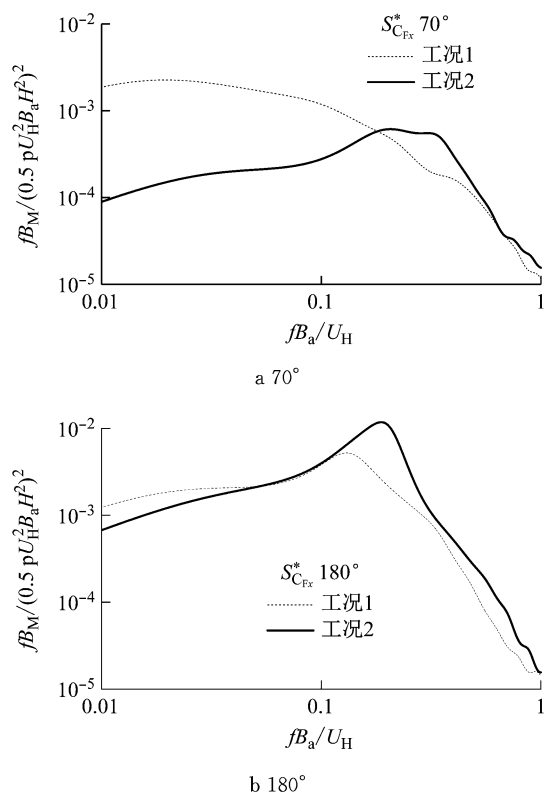


图 15 70°和 180°风向角下工况 1 和工况 2 的 $S_{C_{Fx}}^*$

Fig. 15 $S_{C_{Fx}}^*$ of Case 1 & Case 2 for 70°& 180°

综上所述,当姊妹楼相对于目标建筑处在来流上游时,其遮挡效应不但会使目标建筑顺风向气动力平均值和脉动值都显著降低,同时还会使目标建筑横风向气动力脉动值也有所下降,从而降低目标建筑顺风向和横风向的风荷载峰值;当姊妹楼相对于来流处在目标建筑一侧时,它与目标建筑间狭管效应会增大目标建筑的横风向气动力脉动值,从而最终增大目标建筑的横风向风荷载峰值。

4.3 背景建筑群的影响

图 16 和图 17 分别为目标建筑在工况 2 和工况 4 下 x 轴及 y 轴向的风荷载系数 C_{Fx} 和 C_{Fy} 随风向角变化的情况,其中,工况 4 是在工况 2 的基础上新增了背景建筑群。

通过比较工况 2 与工况 4 的气动力系数平均值的差异可以看出,风向角处于 270°~290°之间时工况 4 中的 C_{Fx_mean} 显著降低,风向角为 290°~340°时 C_{Fy_mean} 的绝对值也降低了很多。这主要是由于在 270°~340°方向有密集的背景建筑群,它们虽然相对于拟建大高楼较低矮,但也不乏与目标建筑高度相当的建筑存在,其遮挡作用不可忽视。

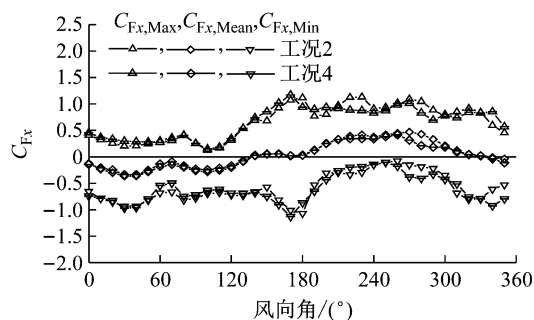


图 16 工况 2 和工况 4 的 C_{Fx} 统计值对比

Fig. 16 The comparison of C_{Fx} between Case 2 & Case 4

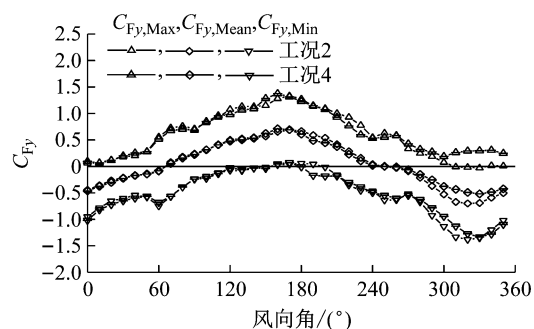


图 17 工况 2 和工况 4 的 C_{Fy} 统计值对比

Fig. 17 The comparison of C_{Fy} between Case 2 & Case 4

比较图 16 和图 17 中工况 2 和工况 4 的风荷载系数峰值还可以发现,在 340°风向角附近,背景建筑群的存在会使目标建筑 x 轴向的峰值风荷载有所增强。这主要是由于在北偏西 20°方向(风向角 340°,目标建筑 + y 方向)较远的地方,都是与目标建筑等高的背景建筑,当来流经过他们再到达目标建筑时,目标建筑的脉动气动力不论是 x 轴向还是 y 轴向均显著增大,最终可能导致目标建筑风荷载峰值的增大。

为了进一步在有拟建大高楼的前提下研究背景建筑群对目标建筑的干扰效应,图 18 和图 19 分别为目标建筑在工况 2、工况 3 和工况 5 下风荷载系

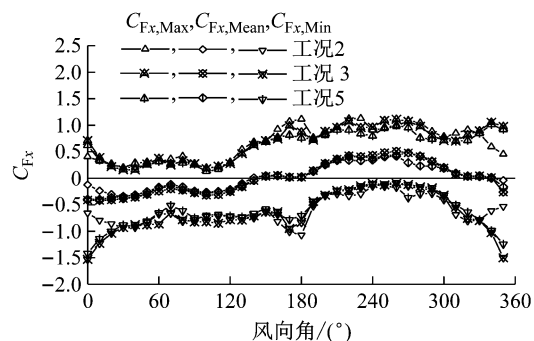
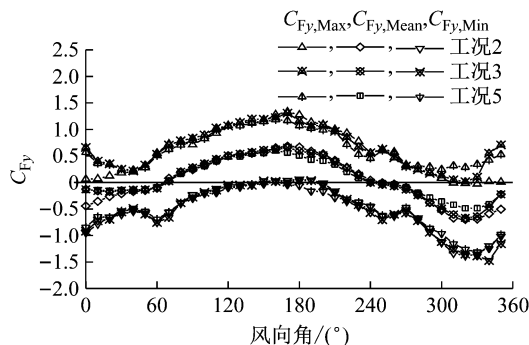


图 18 工况 2、工况 3 和工况 5 各工况的 C_{Fx} 统计值对比

Fig. 18 The comparison of C_{Fx} among Case 2, Case 3 & Case 5

图 19 工况 2, 工况 3 和工况 5 各工况的 C_{Fy} 统计值对比Fig. 19 The comparison of C_{Fy} among Case 2, Case 3 & Case 5

数 C_{Fx} 和 C_{Fy} 随风向角变化情况, 其中, 工况 3 和工况 5 均有拟建大高楼, 且工况 5 相比工况 3 新增了周边的背景建筑群。

通过比较图 18 和图 19 中工况 3 和工况 5 的差异, 可以看到就气动力平均值而言, 背景建筑群对目标建筑的影响与图 16 和图 17 中所示的规律一样, 即在背景建筑群较密集的风向角下主要起遮挡来流的作用。而就风荷载峰值而言, 在拟建大高楼影响最为突出的 350° 风向角附近, 背景建筑群的存在会使目标建筑 x 轴向及 y 轴向的风荷载峰值都有略微的降低, 但与工况 2 相比, 目标建筑受拟建大高楼的影响依然十分显著。

同样的情况也出现在目标建筑的气动力脉动值上。在图 20 和图 21 中, 通过比较 350° 风向角附近工况 5 和工况 3 的差异, 可以发现, 在无背景建筑群的工况 3 里, C_{Fx_rms} 受拟建大高楼影响上升最大, 而当有背景建筑群的影响时, C_{Fx_rms} 有略微降低, 但仍然很高。可见, 尽管背景建筑群的存在的确可略微削弱上游拟建大高楼对目标建筑气动力脉动值的干扰作用, 但拟建大高楼对目标建筑的影响仍然十分显著。

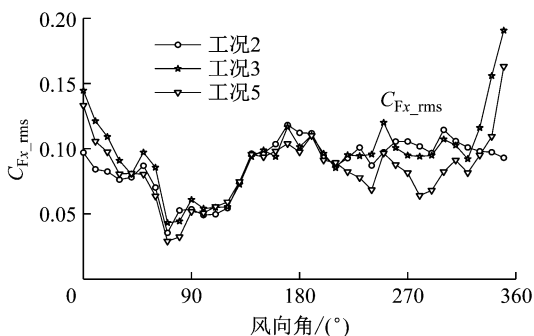
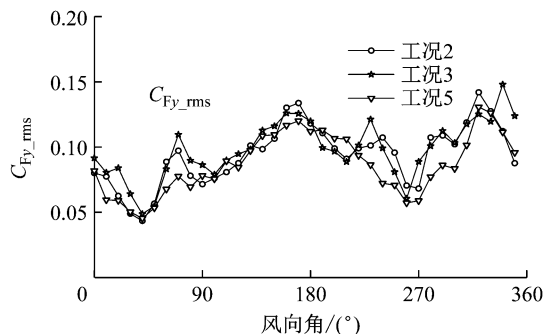
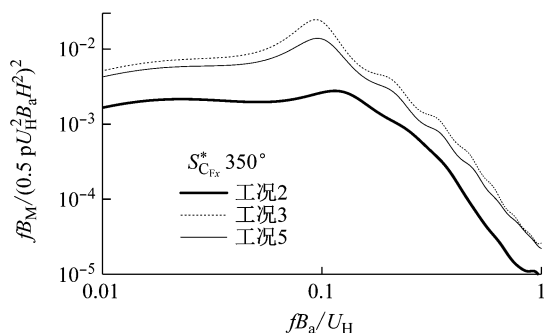
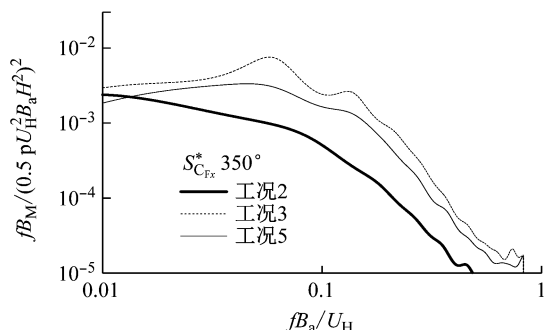
图 20 工况 2, 工况 3 和工况 5 各工况 C_{Fx_rms} 随风向角变化Fig. 20 C_{Fx_rms} of Case 2, Case 3 & Case 5 versus wind angles图 21 工况 2, 工况 3 和工况 5 各工况 C_{Fy_rms} 随风向角变化Fig. 21 C_{Fy_rms} of Case 2, Case 3 & Case 5 versus wind angle

图 22 和图 23 给出各工况下目标建筑在 350° 风向角时的 x 轴向和 y 轴向气动力系数功率谱。图中可以清楚的看到, 相比于工况 3 中的情况, 工况 5 中由于背景建筑群的出现, 目标建筑的 x 轴向和 y 轴向气动力系数均方根值都有所削弱, 但还是显然要比没拟建大高楼的工况 2 要大很多。

图 22 350° 风向角下工况 2, 工况 3 和工况 5 各工况的 $S_{C_{Fx}}^*$ Fig. 22 $S_{C_{Fx}}^*$ of Case 2, Case 3 & Case 5 at a wind angle of 350° 图 23 350° 风向角下工况 2, 工况 3 和工况 5 的 $S_{C_{Fy}}^*$ Fig. 23 $S_{C_{Fy}}^*$ of Case 2, Case 3 & Case 5 at a wind angle of 350°

综上所述, 来流经密集的背景建筑群时, 目标建筑顺风向气动力平均值会显著减小。一些与目标建

筑等规模的背景建筑群可能会增大目标建筑的顺风向和横风向气动力脉动气值,最终导致目标建筑风荷载峰值的增大;同时,尽管背景建筑群的存在会削弱上游拟建大高楼对目标建筑的干扰,但大高楼对目标建筑的影响仍然相当显著。

5 结论

基于一栋超高层建筑模型的刚性模型测压风洞试验,本文通过分析不同工况下目标建筑 x 方向及 y 方向风荷载系数试验结果的变化情况,讨论了邻近更加高大的大型超高层、等高的姐妹楼及其他背景建筑对目标建筑风荷载系数的影响,得出如下结论:

(1) 拟建“高大”建筑的遮挡效应会减小下游既有较低矮建筑的顺风向气动力平均值。但与此同时,由于尾流旋涡脱落的影响,“高大”建筑的出现也可能显著放大下游“低矮”建筑的顺风向和横风向气动力脉动,最终导致其横风向风荷载峰值显著增大,这可能使得原结构设计变得不安全。

(2) 拟建“高大”建筑也会在一定程度上削弱其上游邻近较低矮建筑的横风向气动力脉动,背景建筑较密集时这种影响有可能更为显著。

(3) 紧邻的等高姊妹楼的遮挡效应可能会使下游目标建筑的顺风向气动力平均值和脉动值以及横风向气动力脉动值都有所下降;当姊妹楼相对于来流处在目标建筑一侧时,它与目标建筑间的气流可能会产生狭管效应,导致目标建筑横风向气动力脉动值的增大。

(4) 背景建筑群主要起遮挡来流的作用。在上游背景建筑比较密集时,下游建筑的顺风向气动力系数均值会显著降低。当上游出现一些与目标建筑等高度的背景建筑群时,目标建筑的顺风向和横风向气动力脉动值可能会被放大,导致风荷载峰值的增大。当拟建大型超高层建筑处在目标建筑上游时,背景建筑群的存在会略微削弱大型超高层对目标建筑的干扰效应。

(5) 在实际工程中建设一座比周边建筑更高大的超高层建筑时,它可能会对周围的邻近建筑有不利影响。设计者在关注周边建筑对其风荷载的影响时,也应该就拟建高大建筑的出现对邻近建筑风荷载的影响给予足够的重视。

参考文献:

- [1] SAKAMOTO H, HANU H. Aerodynamic forces acting on two square prisms placed vertically in a turbulent boundary layer [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 31(1): 41.
- [2] TANIKE Y. Interference mechanism for enhanced wind forces on neighbouring tall buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 41(1/3): 1073.
- [3] KHANDURI A C, STATHOPOULOS T, BEDARD C. Wind-induced interference effects on buildings—a review of the state-of-the-art [J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(7): 617.
- [4] XIE Z N, GU M. Mean interference effects among tall buildings [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(9): 1173.
- [5] GU M., XIE Z N, HUANG P. Along-wind Dynamic Interference Effects of Tall Buildings [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2005, 8(6): 623.
- [6] XIE Z N, GU M. Simplified formulas for evaluation of wind-induced interference effects among three tall buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(1): 31.
- [7] LAM K M, LEUNG M Y H, ZHAO J G. Interference effects on wind loading of a row of closely spaced tall buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(5): 562.
- [8] LAM K M, ZHAO J G, LEUNG M Y H. Wind-induced loading and dynamic responses of a row of tall buildings under strong interference [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(5): 573.
- [9] KIM W, TAMURA Y, YOSHIDA A. Interference effects on local peak pressures between two buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(5): 584.
- [10] KIM W, TAMURA Y, YOSHIDA A. Interference effects on aerodynamic wind forces between two buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 147: 186.
- [11] HUI Y, YOSHIDA A, TAMURA Y. Interference effects between two rectangular-section high-rise buildings on local peak pressure coefficients [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 37: 120.
- [12] YU X F, XIE Z N, ZHU J B, *et al.* Interference effects on wind pressure distribution between two high-rise buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 142: 188.
- [13] YAN B, LI Q S. Wind tunnel study of interference effects between twin super-tall buildings with aerodynamic modifications [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 156: 129.
- [14] HUI Y, TAMURA Y, YANG Q S. Analysis of interference effects on torsional moment between two high-rise buildings based on pressure and flow field measurement [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 164: 54.