

两串列方形高层建筑局部风压干扰特性分析

韩 宁, 顾 明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要:对2个完全相同的串列方形高层建筑模型进行了受扰建筑风压测量的风洞试验。根据试验结果,分析了施扰模型相对位置和高度变化对受扰模型局部风压的影响。结果显示,高度比固定,迎风面平均风压在间距比小于3时为负压,大于3时为正压,侧风和背风面平均负压及各个面脉动风压均在间距比等于3时取得最大值。高度比变化,间距比小于3时,迎风面平均负风压随高度比的增大而增大,侧风和背风面则在等高时取得最小值,和平均风压不同,迎风、侧风面脉动风压均在等高时取得最大值,背风面在等高时取得最小值;当间距比大于3时,平均风压在各个面上均随高度比的增大而减小,脉动风压在迎风和侧风面随高度比的增大而增大,背风面则在等高时取得最小值。

关键词:方形高层建筑;串列;干扰;间距比;风洞试验;平均风压;脉动风压

中图分类号:TU321.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)05-0013-10

Characteristics of Interference Effects on Local Pressure of Two Square Tall Buildings in Tandem Arrangement

HAN Ning, GU Ming

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

Abstract: Wind tunnel tests were carried out to study the wind pressure on principal square building adjacent to another one in tandem. The interference effects on local pressure of the principal building were analyzed with different positions and heights of interfering building. It is shown that as height ratio is fixed, mean pressures on windward face are suction when spacing ratio is less than 3, otherwise they are positive. The magnitudes of mean suction on the side and leeward faces and fluctuating pressures on each face all get their maximums when spacing ratio is 3. As height ratios change, the magnitudes of mean suction on windward face increase with height ratio, meanwhile, the magnitudes on other faces obtain their minimums as the height ratio is 1.0 and the spacing ratio is less than 3. The fluctuating pressures on the windward and side faces get their maximums and that on the leeward face reaches its minimum as the height ratio is 1.0. When the spacing ratio is greater than 3, mean pressures on each face decrease, while fluctuating pressures on the windward and side faces increase as the height ratio increases, and the fluctuating pressures on the leeward face get the minimum when the height ratio is 1.0.

Key words: tall square building; tandem arrangement; interference; spacing ratio; wind tunnel test; mean pressure; fluctuating pressure

收稿日期:2010-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目(90715040);科技部科技支撑计划(2006BAJ03B04);上海市科技攻关计划资助(09dzl2077704)

作者简介:韩 宁(1981-),女,博士生,主要从事结构风工程的研究,(E-mail)07ninghan@tongji.edu.cn.

顾 明(通讯作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)minggu@tongji.edu.cn.

对于流场中的钝体结构,由于来流的分离和再附,其在迎风面、侧风面和背风面的风压分布特性是不同的^[1]。当考虑临近建筑的干扰效应时,受扰建筑各个面的风压变得更加复杂。由于工作量巨大,国内外对高层建筑干扰效应的研究主要集中在风荷载方面^[2-5],而对于风压干扰的研究较少,只有少量的研究成果。文献^[6]通过平均和极值风压系数定义的干扰因子分析了高层建筑产生的抖振效应对位于其周边低矮建筑的影响,发现低矮建筑表面压力系数有显著的增加。文献^[7]研究了并列布置的两不同截面模型在不同间距比下表面风压系数的变化特征,给出了由于间距比较小产生的狭缝效应导致了大截面模型的内侧较大负压的结论。结合实际工程项目,文献^[8]研究了受扰建筑特定高度处截面的风压分布特性,指出当施扰建筑处于受扰建筑尾流边界的某些位置时,受扰建筑表面的最大负压系数有可能降低,但当两者距离较近时,局部风压则有可能放大较多。文献^[9]分析了 3 个典型串列位置处上下游 2 建筑表面的脉动风压系数变化规律,指出在间距比大于 3 时,受扰模型各个面上的脉动风压均变大。同样考虑多个建筑相互干扰时,文献^[10]则分析了斜风向 3 个紧密布置建筑的干扰效应,给出了特定间距比和风向角下受扰建筑各个面上的风洞试验和数值模拟的平均风压系数分布等值线图,指出受扰建筑背风面出现了极大的负压,但其没有分析间距比改变的影响。对一般性方形高层建筑模型,以风压系数干扰因子为指标详细地分析串列布置时施扰建筑对于测试模型表面局部风压的影响,得出了一些有普遍意义的结论。

1 试验简介

1.1 风洞及风场

试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-2 风洞进行。TJ-2 风洞为闭口回流式矩形接口风洞,试验段宽 3 m、高 2.5 m、长 15 m。采用被动模拟方法在 TJ-2 风洞模拟了中国规范(GB 50009—2001)^[11]中的 C 类风场(密集建筑群的城市市区,风速剖面指数 $\alpha=0.22$),几何缩尺比为 1:400。试验风速为 12 m/s。由于中国规范未给出各类地貌紊流度剖面,故试验采用日本建筑荷载规范(AIJ2004)^[12]建议的紊流度公式。详细的平均风速剖面和紊流度剖面的模拟结果与理论值的比较见文献^[13]。

1.2 试验概况

试验模型为尺寸为 900 mm×150 mm×150 mm

的方柱,几何缩尺比为 1:400。在模型上共计布置 496 个测点,每个立面上均有 124 个测点,4 个面测点布局相同,均在模型的最上部和棱边处布置较密的测点,具体的测点布置图见文献^[13]。试验时施扰模型和受扰模型完全相同,但其表面没有布置测点。考虑施扰模型位置变化的影响时,串列布置选取 6 个典型位置、并列布置选取 4 个典型位置、斜列布置选取 6 个典型位置,详细的布置图见文献^[13]。由于试验结果太多,该文仅分析串列布置的情况。考虑施扰模型高度变化的影响时,施扰模型横截面均为 150 mm×150 mm,高度分别为测试模型高度的 0.7、1.0 和 1.3 倍。

2 结果分析

2.1 试验数据处理方法

该文的平均和脉动风压系数定义和文献^[1]相同:

$$\bar{C}_p = \frac{(\bar{p} - p_0)}{(0.5\rho u_r^2)} \quad (1)$$

$$C'_p = \frac{\sqrt{\bar{p}'^2}}{(0.5\rho u_r^2)} \quad (2)$$

式(1)和(2)中, \bar{C}_p 为平均风压系数, \bar{p} 为平均风压, p_0 为静止大气压, C'_p 为脉动风压系数, $\sqrt{\bar{p}'^2}$ 为均方根脉动风压, ρ 为大气密度, u_r 为屋顶高度处的平均风速,参考高度取为屋顶高度。

分析干扰效应时,定义平均、脉动风压系数干扰因子如下:

$$IF_{\bar{C}_p} = \frac{\text{干扰状态下受扰建筑的平均风压系数}}{\text{单体建筑平均风压系数}} \quad (3)$$

$$IF_{C'_p} = \frac{\text{干扰状态下受扰建筑的均方根脉动风压系数}}{\text{单体建筑均方根脉动风压系数}} \quad (4)$$

施扰建筑的影响主要通过干扰因子 IF 来体现, $|IF| > 1$ 表示增加, $|IF| < 1$ 表示减小。

在考虑施扰模型高度变化的影响时,定义高度比:

$$\eta_h = \frac{\text{施扰模型高度}}{\text{受扰模型高度}} \quad (5)$$

2.2 间距比的影响

2.2.1 平均风压分析 由于是串列布置且来流风垂直于受扰模型横截面,所以在分析施扰位置对风压的影响时,考虑对称性仅取其中一个侧面进行研究。

图 1—图 3 分别为 0° 风向角施扰模型处于不同串列位置时,受扰模型迎风面、侧风面和背风面平均风压系数干扰因子等值线分布图。

图 1 中(a)图为无施扰建筑(单体状态)迎风面平均风压系数等值线分布图,图(b)–(g)是根据式(1)计算的不同间距比时平均风压系数干扰因子等值线图,从中可以更清楚地看出建筑物受扰以后风压的变化情况。由图可以看出间距比等于 3 是一个临界值。间距比小于 3 时,迎风面绝大部分干扰因子为负值,和图(a)对比知这些部位的平均风压系数为负值,说明这些部位产生了吸力,而在间距比大于 3 时,仅在迎风面的两侧棱边处出现负的干扰因子。由此可见,串列布置的 2 个建筑物,随间距比的变化会出现 2 种不同的流动模式:当间距小于临界间距时,前柱的涡街被抑制;当间距大于临界间距时,2 柱均形成涡街,前柱和后柱的涡相互作用,这和文献 [14] 的研究结论是吻合的。该文中间距比小于 3

时,上游施扰建筑的涡街被抑制,其后的高速分离剪切流再附到下游建筑侧面,这样在两建筑间形成了漩涡区,所以在受扰建筑迎风面出现负压区其干扰因子数值基本介于(−0.5~0)之间;而当间距比大于 3 时,上游施扰建筑后形成的漩涡脱落进入到间隙区,使受扰建筑的迎风面出现正压,但由于其后的尾流速度小于单体状态时来流速度,故受扰建筑迎风面干扰因子基本介于(0~0.5)之间且随间距比的增大而增大,在间距比等于 8 时,其值主要介于(0.5~1)之间。值得注意的是在迎风面的顶部和棱边的局部,平均风压系数干扰因子会显著放大,由图可知,干扰因子最大值随着间距比的增大而减小。综上分析,上游施扰建筑的存在对平均风压有减小的作用,即对平均风压的干扰效应表现为遮挡效应。

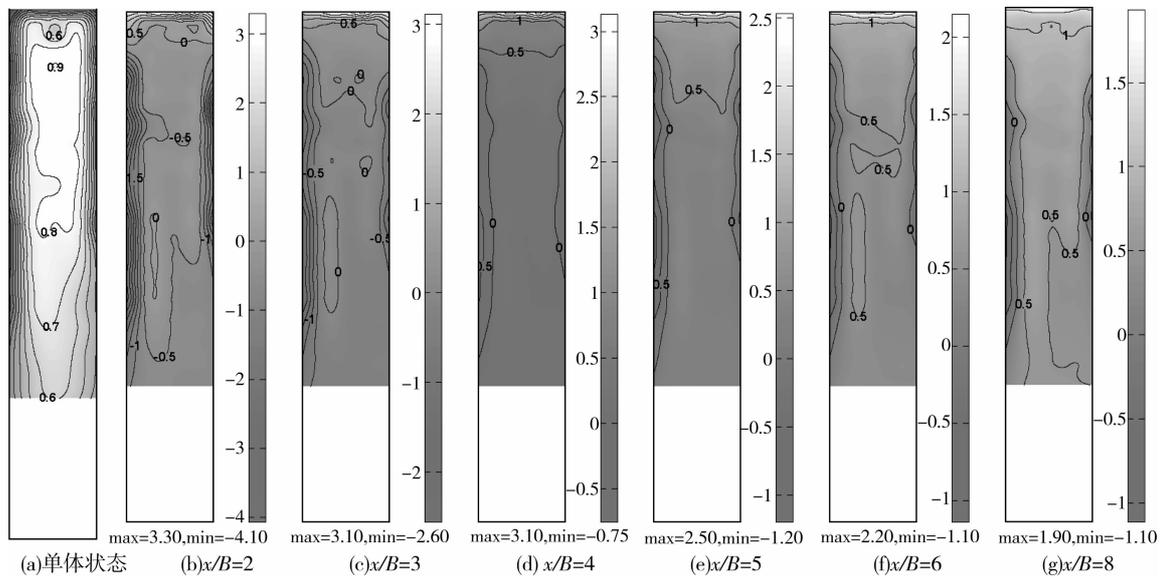


图 1 串列布置时受扰模型迎风面平均风压系数干扰因子等值线图(0°风向角)

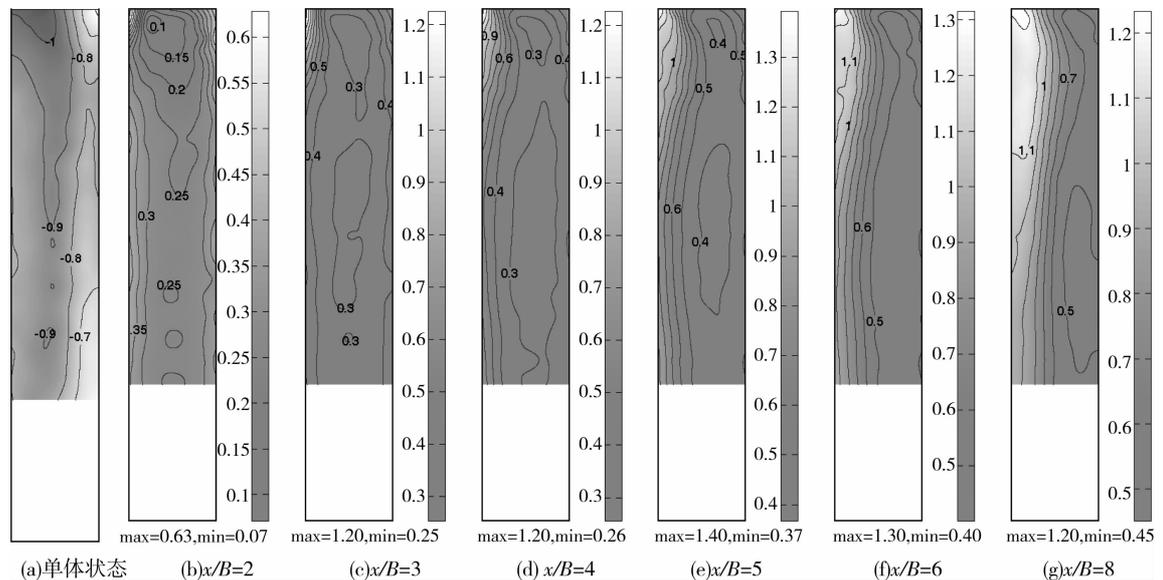


图 2 串列布置时受扰模型侧面平均风压系数干扰因子等值线图(0°风向角)

和迎风面相比,侧面平均风压串列布置的干扰效应随间距比的变化规律较为一致,由图 2 可以看出,干扰因子均为正值,这表明即使有施扰建筑的存在,下游受扰建筑的侧面平均风压仍然为负值。但值得注意的是,侧面的前缘上端角部处干扰因子均较大。另由图(a)可知,单体状态下侧面局部平均负风压系数(吸力)最大值也处于该位置,吸力最大值超过了一,当施扰建筑存在时,该部位的干扰因子大于 1,说明施扰建筑的存在导致了吸力的放大,局部吸力放大超过了 1.4。这是由于随着间距比的增大,来

自上游建筑的分离流直接撞击到下游受扰建筑的迎风面上端,加速了侧面前缘角端分离流的再分离,所以其分离流速度增大,导致吸力增加。

图 3 为背风面平均风压系数干扰因子等值线图,由图可以看出,无论间距比的大小,干扰因子在背风面均小于 1 且为正值,对比图(a)可知,施扰建筑存在时,受扰建筑背风面平均风压仍然为负值,但吸力相对单体状态变小,这是由于上游施扰建筑的存在使受扰建筑后缘形成的尾流速度相对单体状态均变小。

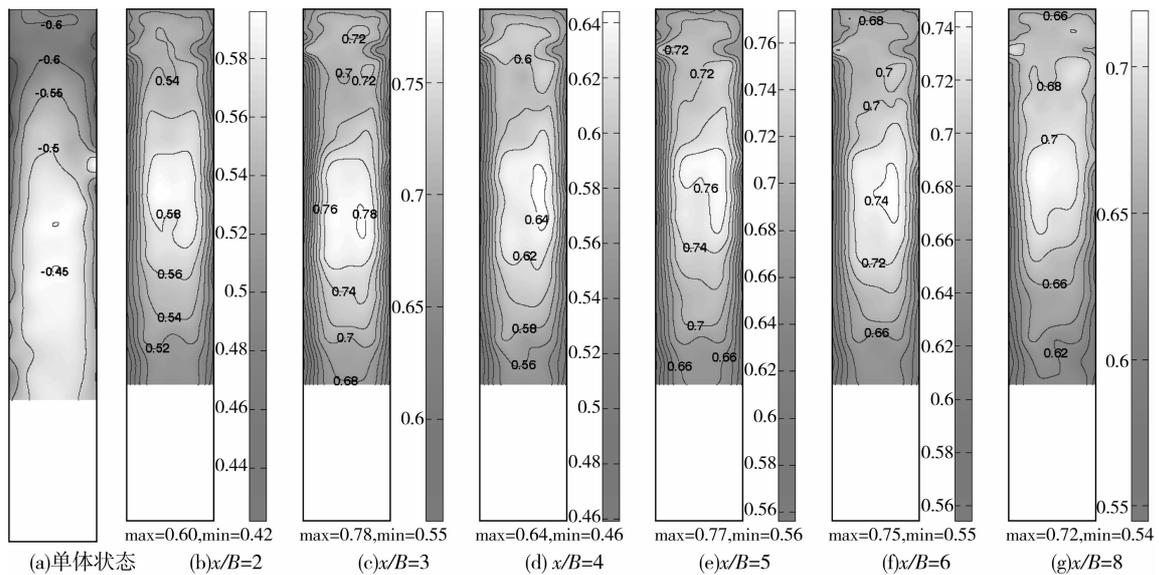


图 3 串列布置时受扰模型背风面平均风压系数干扰因子等值线图(0°风向角)

2.2.2 脉动风压分析 图 4—图 6 为 0°风向角施扰模型处于不同串列位置时,下游受扰建筑迎风面、

侧面和背风面脉动风压系数干扰因子等值线分布图。

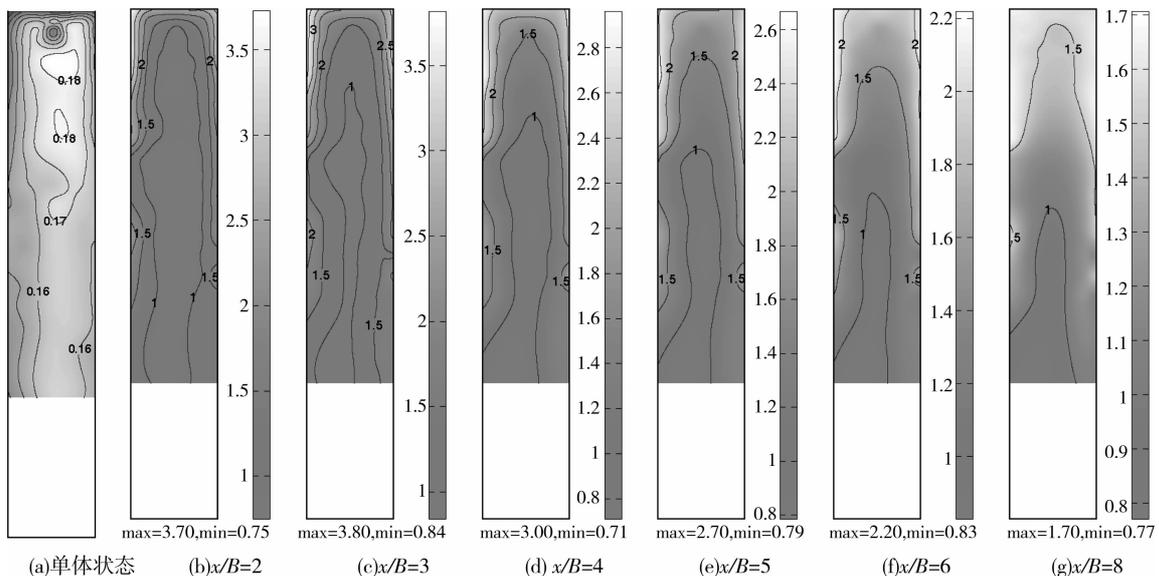


图 4 串列布置时受扰模型迎风面脉动风压系数干扰因子等值线图(0°风向角)

由图 4 可以看出,随间距比的增大,迎风面脉动风压系数干扰因子大于 1 的范围也随之增大,而最大值却随之减小。在间距比等于 3 时,干扰因子最大值在接近屋顶的两侧棱边处达到了 3.8,但间距比等于 8 时,干扰因子最大值仅有 1.7。这是因为,在间距比小于 3 时,前后建筑空隙间形成了稳定的漩涡区,而在屋顶两侧棱边处,由于间距比较小,上游施扰建筑的分离剪切流快速再附到受扰建筑的侧风面,然后在受扰建筑后缘再次分离,并在其后形成了准周期性漩涡脱落。图 5 中间距比小于 3 的侧面风面干扰因子分布图证明了这种现象,其侧风面前缘由于分离剪切层再附,脉动风压较单体状态变大。

当间距比大于 3 时,施扰建筑和受扰建筑均可以在各自后形成漩涡脱落,和单体状态相比,由于下游受扰建筑迎风面来流中湍流脉动增加所以其迎风面脉动风压增加,表现为干扰因子大于 1 的范围扩大,如图 4(d)–(g)所示,但其最大值却减小了,证明干扰效应随间距比的增大而减弱。该间距比范围内,侧风面脉动风压也相应的增大,因为上游施扰建筑尾流中的漩涡直接撞击到下游受扰建筑迎风面,加速了侧风面前缘的剪切层分离速度,形成了较大的脉动,如图 5(d)–(g)所示,其干扰因子大于 1 的范围随间距比的增大而扩大,同样可以注意到,随间距比增大,干扰因子最大值减小。

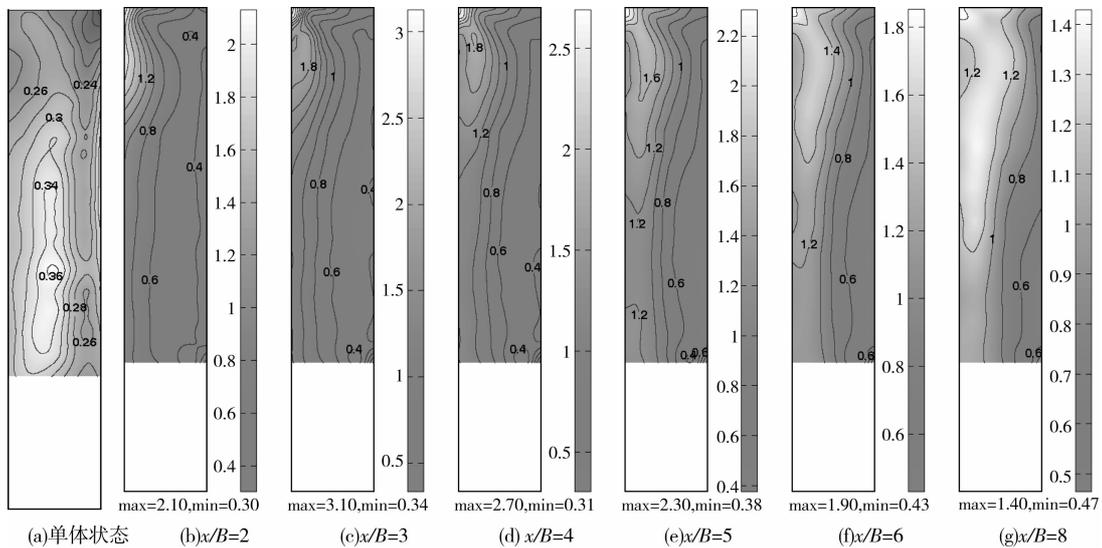


图 5 串列布置时受扰模型侧风面脉动风压系数干扰因子等值线图 (0° 风向角)

图 6 为背风面脉动风压系数干扰因子随间距比的变化图,可以看到干扰因子仅在间距比等于 3 时在背风面中间部位数值超过了 1,其它工况下,干扰

因子数值均小于 1。这一结论说明上游施扰建筑的存在使得下游受扰建筑背风面后的涡脱强度相对单体状态时变小,所以背风面脉动风压减小。

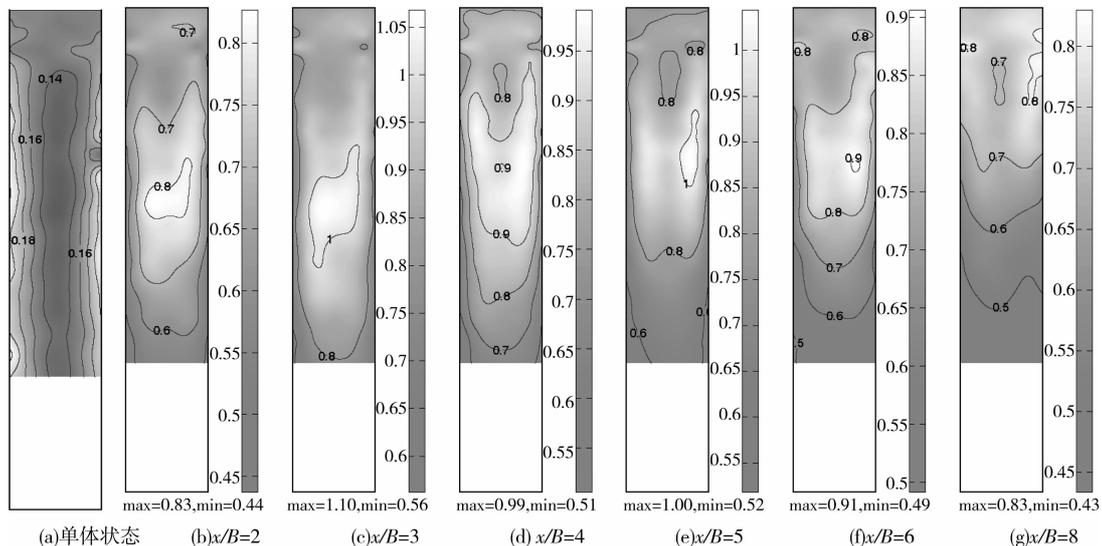


图 6 串列布置时受扰模型背风面脉动风压系数干扰因子等值线图 (0° 风向角)

2.3 高度比的影响

根据不同施扰位置对于受扰模型风压分布的影响,选取典型位置 $x/B=2, y/B=0$ 和 $x/B=8, y/B=0$ 来分析施扰模型位置固定但高度变化对于受扰模型风压的影响。

2.3.1 平均风压分析 图 7 是典型串联位置处迎风面平均风压系数干扰因子分布图。由图可以看出,间距比等于 2 时,若高度比等于 0.7,则干扰因子在迎风面中上部均为正值且越靠近顶部数值越大,0.8 H 以上超过了 1.0,这是因为施扰建筑高度低于受扰建筑时,越过施扰建筑顶部的分离流会直接撞击到下游受扰建筑迎风面上后迅速向上爬升,并和空气中的来流叠加,导致干扰因子大于 1;而在迎风面的下部,干扰因子为负值,这是因为间距比较

小时,上游建筑两端的分离流直接再附到受扰建筑两侧,所以其后的漩涡脱落受到抑制,这样在两建筑间的空隙形成了稳定的漩涡区,从而产生了负压。这在高度比等于 1.0 和 1.3 的干扰因子分布图中得到了证实,尤其是高度比等于 1.3 时,受扰建筑迎风面的干扰因子全为负值;且随高度比增大,负干扰因子绝对值也增大,在高度比等于 1.3 时取得最大值 -6.4,所以间距比较小时,高度比越大对于迎风面越不利。间距比等于 8 时,3 种高度比的干扰因子基本均为正值。在高度比等于 0.7 时,干扰因子介于(0.5~1.2),而当高度比增大到 1.3 时,其值基本介于(0~0.5)之间,这说明高度比越大,遮挡效应越明显,对受扰建筑迎风面越有利。

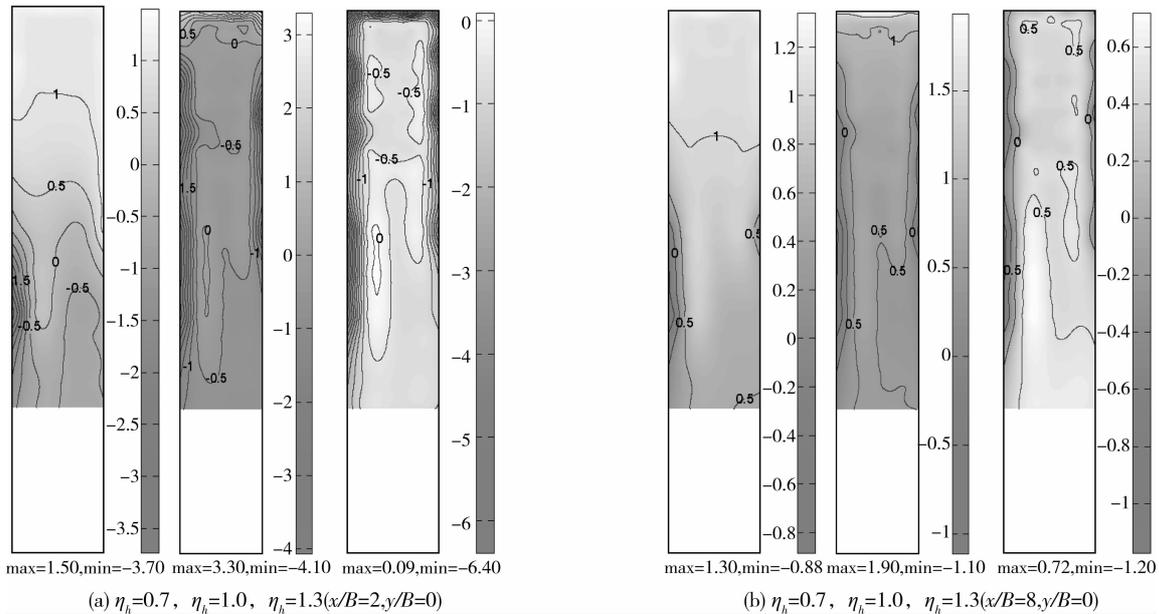


图 7 典型串联位置处迎风面平均风压系数干扰因子等值线图随高度比变化图(0°风向角)

图 8 是典型串联位置处侧面平均风压系数干扰因子分布图。由图可以看出,间距比等于 2 时,平均风压系数干扰因子最大值随高度的增大呈先减小后增大的趋势,以高度比等于 1.0 为转折点。当高度比等于 0.7 时,侧面干扰因子在约 $2/3H$ 高度处取得最大值 1.7;而当高度比 $\eta_h \geq 1$ 时,平均风压系数干扰因子均小于 1.0,说明此时施扰建筑的存在对侧风面的平均分压是有利的。这是因为间距比较小时,上游施扰建筑两侧棱边处的分离流直接再附到下游受扰建筑的侧风面上,从而减小了侧风面的风吸力,但是当高度比小于 1.0 时,在受扰建筑侧面高度大于施扰建筑的部分来流会形成局部加速

效应,导致受扰建筑这一部位的吸力极大。间距比等于 8 时,侧面干扰因子随高度比的增大而减小,这和间距比较小时的规律不同。这是因为高度比越大,施扰建筑的遮挡效应越显著,这样到达受扰建筑侧面的尾流速度越小,自然平均风压系数也越小,平均风压系数干扰因子在高度比等于 0.7 时取得最大值 1.3。

图 9 是典型串联位置处背风面平均风压系数干扰因子分布图。可以看出,间距比等于 2 时,平均风压系数干扰因子均小于 1,说明施扰建筑的存在减小了背风面的吸力。值得指出的是,高度比 $\eta_h \geq 1$ 时背风面的干扰因子随高度比的增大而增大,这和

间距比等于 8 时不同,其在高度比 $\eta_h \geq 1$ 时,干扰因子随高度比增大趋于稳定。出现这种现象的原因是因为背风面的风压除了受两侧面的分离流影响外还要受其后漩涡脱落的影响。一方面由于施扰建筑的遮挡效应,来流在到达背风面时的速度减小,背风面平均风压系数干扰因子小于 1;但是高度越大的施扰建筑形成的尾流区域也较大,自然受扰建筑后形

成的漩涡脱落速度要快,带走的空气也越多,这对遮挡效应有所削弱。2 种原因综合作用下出现了间距比较小时等高干扰下背风面干扰因子最小的现象,而当间距比较大时由于施扰建筑的遮挡效应减弱,高度比变化的影响也相应减弱,所以背风面平均风压系数干扰因子改变较小。

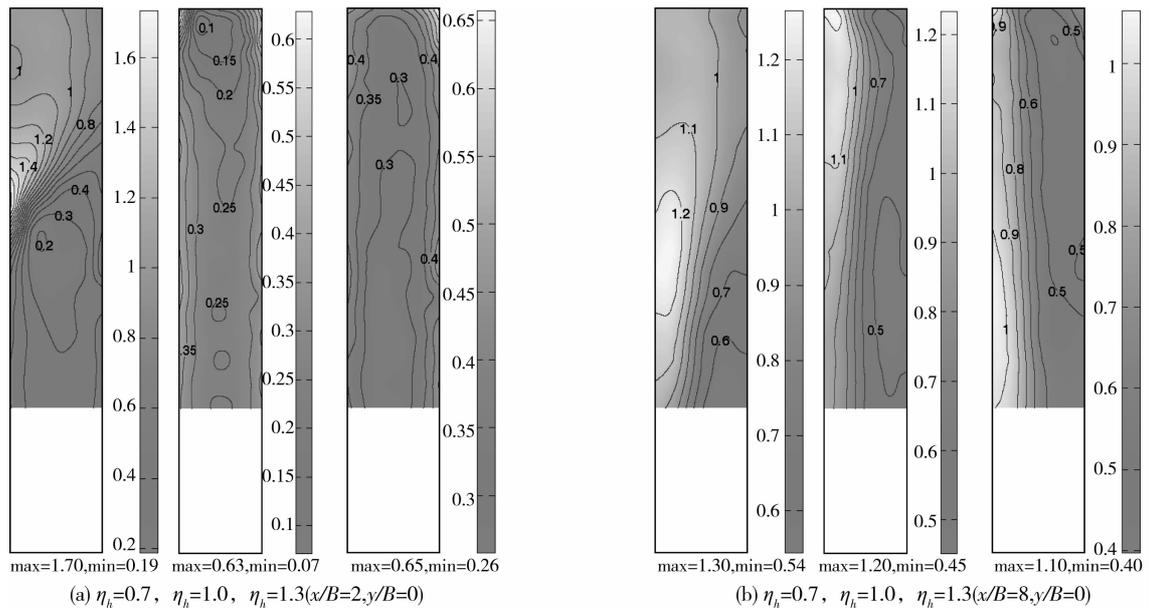


图 8 典型串列位置处侧风面平均风压系数干扰因子等值线图随高度比变化图(0°风向角)

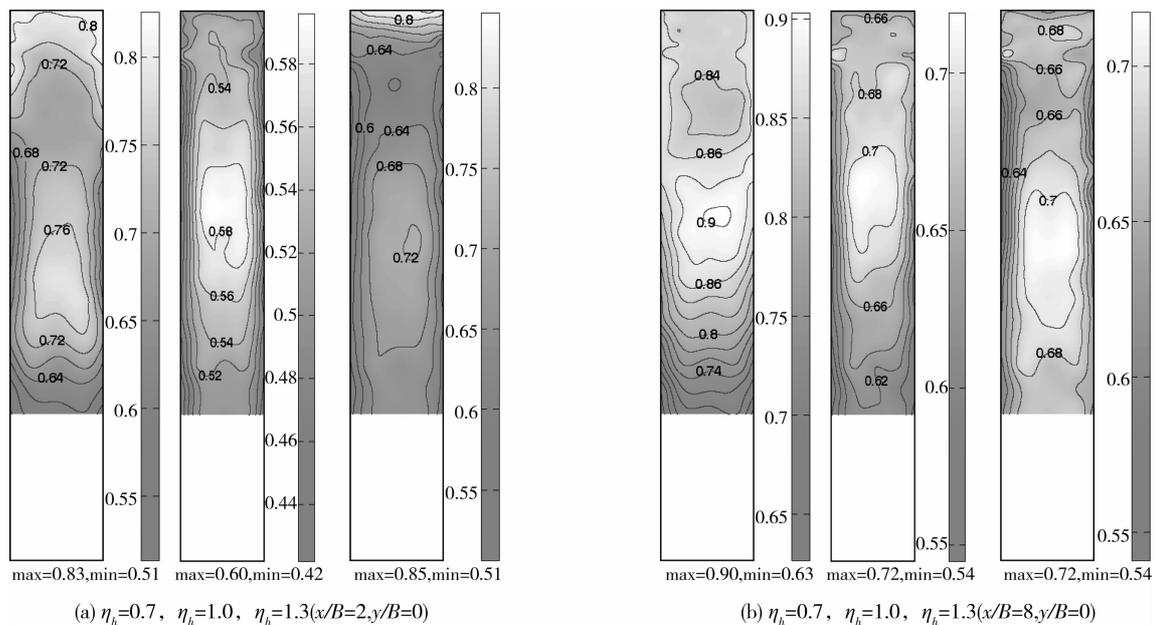


图 9 典型串列位置处背风面平均风压系数干扰因子等值线图随高度比变化图(0°风向角)

2.3.2 脉动风压分析 图 10 是典型串列位置处迎风面脉动风压系数干扰因子分布图。由图可以看出,间距比等于 2 时,脉动风压系数干扰因子在迎风

面均沿中轴线对称分布且由中间向两棱边处增大;高度比 $\eta_h \leq 1$ 时,迎风面大部分干扰因子均小于 1,这和间距比较大时有着显著的不同,说明此时受扰

建筑迎风面的流体脉动要小于单体状态时迎风面的流体脉动;高度比增加,干扰因子大于 1 的范围增大,但其最大值则呈先增大后减小的趋势,在高度比等于 1.0 时干扰因子取得最大值 3.7。受高度比改变的影响,干扰因子最大值的位置由高度比等于 0.7 时的大约 $0.65H$ 处上升到高度比 $\eta_h \geq 1.0$ 时的迎风面顶部的两端角部处。间距比等于 8 时,随

高度比增大,脉动风压系数干扰因子最大值也相应增大,在高度比等于 1.3 时取得最大值 2.5。这是因为间距比较大时,随着高度比的增大,施扰建筑后的尾流区域变大且其后的漩涡脱落尺度也增大,从而导致来流湍流脉动增大。但不同高度比干扰因子的最大值出现位置和小间距比时几乎相同,因为脉动风压变化剧烈的位置主要是在流体分离处。

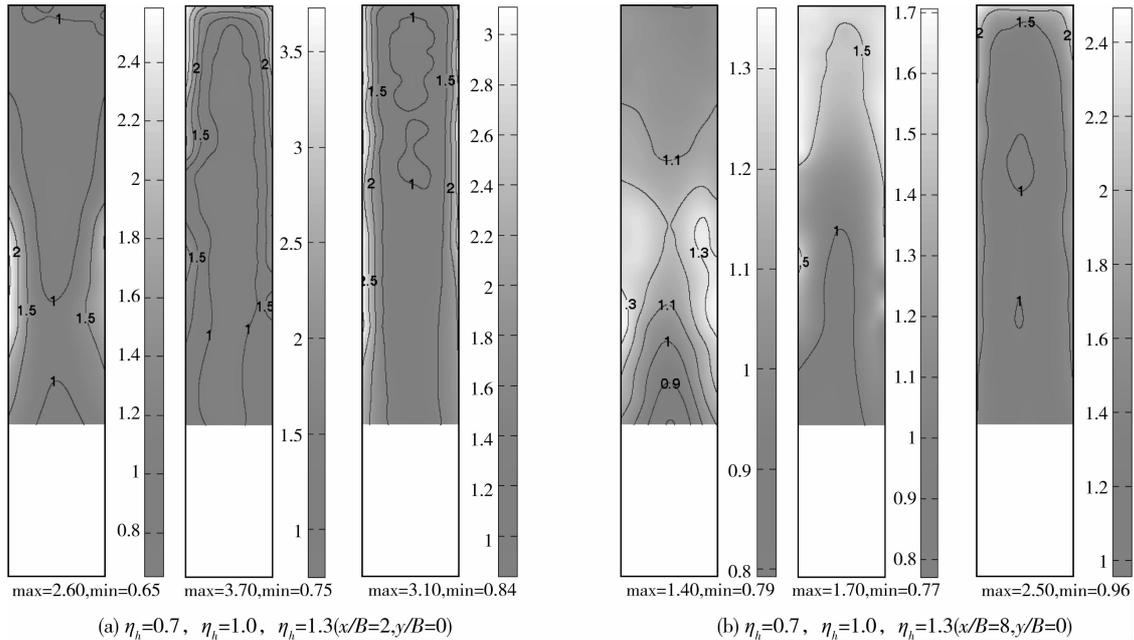


图 10 典型串联位置处迎风面脉动风压系数干扰因子等值线图随高度比变化图(0° 风向角)

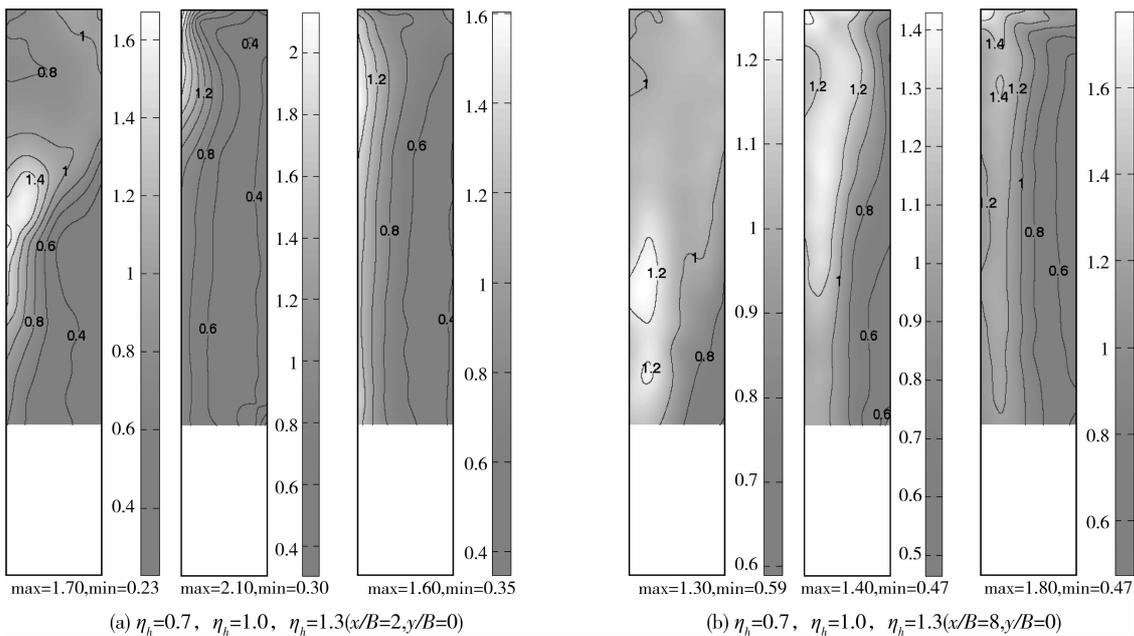


图 11 典型串联位置处侧面脉动风压系数干扰因子等值线图随高度比变化图(0° 风向角)

图 11 是典型串联位置处侧面脉动风压系数干扰因子分布图。由图可以看出,间距比等于 2 时,

脉动风压系数干扰因子在高度比等于 1.0 时取得最大值 2.1。这和迎风面脉动风压的规律基本一致。

因为间距比较小时,施扰建筑后的分离流再附到受扰建筑的侧面,其在侧面前缘处会形成涡流区域,导致脉动增大而高度比等于1.0时,受扰建筑上端角部处受施扰建筑侧面分离流和顶层分离流的共同作用,所以脉动较其它高度比大。而由于高度比变化的影响,干扰因子最大值出现的位置发生了变化:高度比等于0.7时,受扰建筑侧风面的干扰因子

最大值出现在前缘大约0.65H处,而在高度比 $\eta_h \geq 1.0$ 时均出现在迎风前缘的上端棱边处。间距比等于8时,侧风面脉动风压系数干扰因子最大值随高度比的增大而增大。这和迎风面是一致的。间距比较大时,施扰建筑后的涡流脱落和尾流区域均随高度比的增大而增大,从而导致侧风面迎风前缘的脉动风压相对单体状态增大。

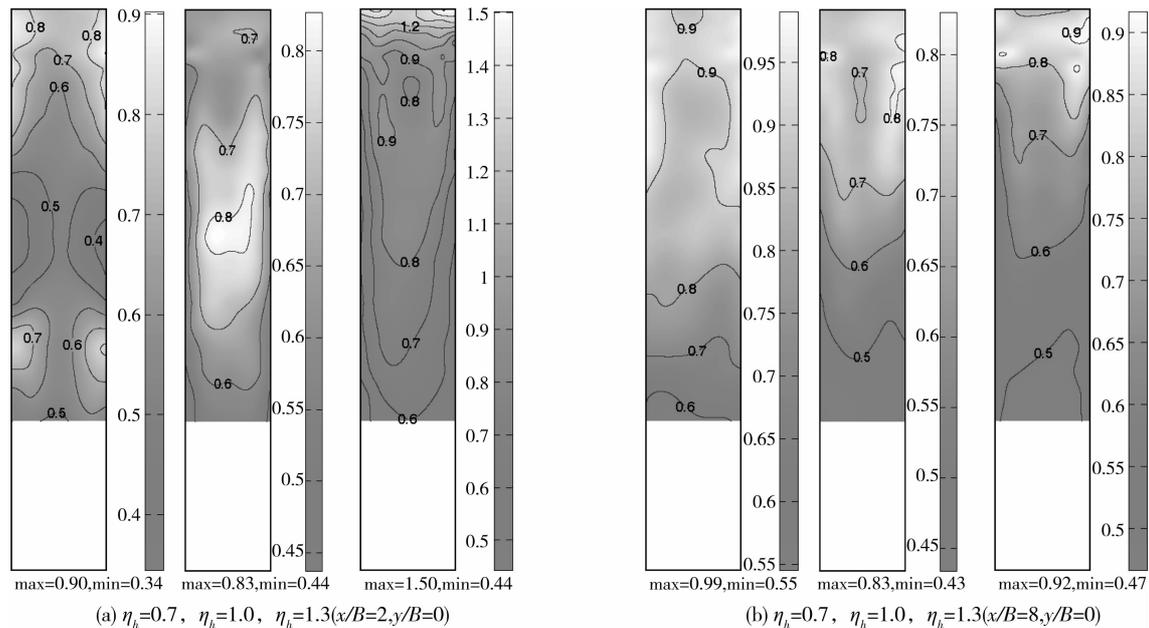


图12 典型串列位置处背风面脉动风压系数干扰因子等值线图随高度比变化图(0° 风向角)

图12是典型串列位置处背风面脉动风压系数干扰因子分布图。由图可以看出,间距比等于2时,脉动风压系数干扰因子最大值随高度比的变化和平均风压系数干扰因子类似,随高度比的增大呈先减小后增大的趋势。在高度比等于1.3时取得最大值1.5。间距比等于8时,干扰因子最大值随高度比的增大呈先减小后增大的趋势,其出现位置均位于背风面的上端且数值小于1.0,这和同样间距比下平均风压系数的规律不同,说明高度比的改变对于脉动风压的影响要大于对平均风压的影响。

3 结论

以风压系数及其定义的干扰因子为研究对象,详细的研究了 0° 风向角下,施扰模型位置变化对受扰方柱迎风面、侧风面和背风面局部风压的影响。由以上的分析可以得出如下结论。

1) 高度比固定,受扰模型迎风面平均风压间距比小于3时为负压,间距比大于3为正压,干扰效应主要表现为遮挡效应,间距比越大,遮挡效应越弱;

其侧风面和背风面平均风压系数干扰因子均为正值且均在间距比等于3时取得干扰因子最大值。和平均风压相比,脉动风压随间距比的变化较为简单。其在受扰模型各个面上的变化规律一致,均在间距比等于3时取得最大值。

2) 高度比变化,当间距比小于3时,高度比越大对迎风面平均风压越不利,侧风面和背风面的平均风压均在等高时取得最小值;当间距比大于3时,受扰模型各个面的平均风压均随高度比的增大而减小。脉动风压随高度比的变化和平均风压不同,当间距比小于3时,受扰模型迎风面和侧风面脉动风压系数干扰因子均在等高时取得最大值;当间距比大于3时,迎风面和侧风面的脉动风压均随高度比的增大而增大,但在背风面上,其脉动风压干扰因子无论间距比大小均在高度比等于1.0时取得最小值。

3) 2建筑串列布置时,侧风面的前缘上端角部是最需要注意的部位,尤其是在2建筑等高,间距比等于3.0时。

参考文献:

- [1] HOLMES J D. Wind loading of structures: second edition[M]. London:Taylor and Francis,2007.
- [2] XIE Z N, GU M. Mean interference effects among tall buildings[J]. Eng. Struct.,2004, 26(9): 1173-1183.
- [3] GU M, XIE Z N. Along-wind dynamic interference effects of tall buildings[J]. Adv. Struct. Eng.,2005, 8:163-178.
- [4] 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): 31-52.
- [5] GU M, HUANG L. Theoretical and experimental studies on the aerodynamic instability of a two-dimensional circular cylinder with a moving attachment [J]. Journal of Fluids and Structures,2008, 24(2): 200-211.
- [6] STATHOPOULOS T. Adverse wind loads on low buildings due to buffeting[J]. Journal of Structural Engineering,1984, 110(10): 2374-2392.
- [7] WONG P T Y, KO N W M, CHIU A Y W. Flow characteristics around two parallel adjacent square cylinders of different sizes [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995 (54/55): 263-275.
- [8] 谢壮宁,石碧青,倪振华. 尾流受扰下复杂体形高层建筑的风压分布特性[J]. 建筑结构学报,2002(04):27-32.
XIE ZHUANG-NING, SHI BI-QING, NI ZHEN-HUA. Wind pressure distribution on complex shape tall buildings under wind action with interference effects by a downwind building [J]. Journal of Building Structures,2002(04):27-32.
- [9] SAKAMOTO H, HAINU H, OBATA Y. Fluctuating forces acting on two square prisms in a tandem arrangement [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1987, 26(1): 85-103.
- [10] LAM K M, LEUNG M Y H, ZHAO J G. Interference effects on wind loading of a row of closely spaced tall buildings[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 2008, 96(5): 562-583.
- [11] GB 50009—2001 建筑结构荷载规范(2006 修订版) [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [12] Architectural Institute of Japan (AIJ) [S]. Recommendations for loads on buildings, Japan,2004.
- [13] 韩宁,顾明. 两串列方柱局部脉动风压干扰研究: 第1部分 迎风面效应[J]. 振动与冲击,2009,28(12):188-192.
HAN NING, GU MING. Interference Effects on Local Fluctuating pressure of two square tall buildings in tandem arrangement; part 1 windward side effects[J]. Journal of Vibration and Shock,2009,28(12):188-192.
- [14] 陈素琴,黄自萍,沈剑华,等. 两串列方柱绕流的干扰数值研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2001, 29(3): 320-326.
CHEN SU-QIN, HUANG ZI-PING, SHEN JIAN-HUA, et al., Numerical computation of the flow around two square cylinders in tandem arrangement [J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2001, 29(3):320-326.

(编辑 胡 玲)