

文章编号: 1000-5013(2011)01-0087-05

# 品字形建筑群静力干扰效应的数值模拟

刘春艳, 张春晖, 彭兴黔

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 研究品字形建筑群静力干扰效应,以及受扰建筑表面风压系数干扰因子的空间分布,分析建筑相对位置变化对静力干扰效应的影响. 结果表明,建筑物串联布置且间距较小时,遮挡效应明显;建筑间斜列布置时,静力干扰效应减弱;建筑间并列布置时,容易发生狭缝效应. 对于成品字形建筑群,下两建筑对上一建筑的干扰效应具有遮挡效应又有狭缝效应. 受扰建筑表面风压的干扰因子,其分布沿高度和宽度的不同位置而变化显著.

**关键词:** 品字形建筑群; 静力干扰效应; 数值模拟; 干扰因子; 流场分析

**中图分类号:** TU 973<sup>+</sup>.32; TB 126

**文献标识码:** A

现代城市建设中的密集建筑群,由于相邻建筑物之间的流场相互干扰,受扰高层建筑的风荷载大小及性态与单体建筑相比有较大的变化,在某些情况下可能会大大超过单体时的风力,从而引起抗风设计中的安全问题. 影响群体建筑干扰效应的变量很多,主要包括:建筑物的外形、尺寸和个数,建筑物的相对位置,风向角,风场(上游地貌)及风速等. 建筑相对位置的变化对静力干扰效应具有显著的影响. 当有两个施扰物体时,其相对位置较复杂,可研究的工况较多. 本文针对品字形建筑群的 0°风向角的上两建筑对下一建筑的干扰效应进行研究.

## 1 基本方程及数值模拟

### 1.1 基本方程

研究对象是高层建筑群,风的流动属于不可压缩的低速湍流. 气流与建筑物的接触形成限制流,采用标准  $\kappa$ - $\epsilon$  模型对于限制流(有壁面约束)具有较好的效果<sup>[1]</sup>,且标准  $\kappa$ - $\epsilon$  模型计算成本低、预算较为准确<sup>[2]</sup>. 在稳态效应下,基于 Reynolds 时均方程和标准  $\kappa$ - $\epsilon$  模型所组成的湍流控制方程<sup>[3-4]</sup>为

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[(v + v_t) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}] + \frac{\partial}{\partial x_j}(v_t \frac{\partial U_j}{\partial x_i}), \quad (1)$$

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}[(v + \frac{v_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + v_t (\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon, \quad (2)$$

$$U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}[(v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + c_1 \frac{\epsilon}{k} v_t (\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - c_2 \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \quad (4)$$

上式中: $P$  为压力; $U_i$  ( $i=1,2,3$ ) 分别为  $x,y,z$  方向的平均速度分量; $v$  为气流运动粘性系数; $k$  和  $\epsilon$  分别为湍流动能及其耗散率; $v_t$  为湍流涡黏性系数, $v_t = c_\mu k^2 / \epsilon$ ; 常系数  $c_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$ ,  $c_1 = 1.14$ ,  $c_2 = 1.92$ , 它们都是由典型流动的试验结果和算例结果通过数据拟合得到<sup>[5-6]</sup>.

**收稿日期:** 2009-07-11

**通信作者:** 彭兴黔((1959-),男,教授,主要从事结构风工程的研究. E-mail:pxq@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 福建省自然科学基金资助项目(2009J01255); 福建省厦门市科技计划高校创新项目(3502Z20083039); 福建省泉州市科技计划重点项目(2007G7); 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室开放基金资助项目(2009-01)

1.2 数值模拟

1.2.1 计算模型 研究的群建筑特征尺寸: $b \times h = 50\text{ m} \times 60\text{ m}$ , 其平面布置如图 1. 其中:建筑横风向间距  $S_x$  分别为  $1.5b, 2.0b, 3.0b, 4.0b, 6.0b$ ; 顺风向间距  $S_y$  分别为  $2.0b, 3.0b, 5.0b, 8.0b, 12.0b$ .

1.2.2 计算域与边界条件 来流风取为均匀流, 其湍流强度采用日本建筑学会建筑荷载建议, 即

$$I_Z = 0.1(Z/Z_G)^{-\alpha-0.05}, \tag{5}$$

式(5)中:在 C 类地貌下, 梯度风高度  $Z_G = 400\text{ m}$ ,  $Z$  为离地高度, 地面粗糙系数  $\alpha = 0.22$ . 进流面选用速度入口, 其速度分布服从指数率, 即

$$U_Z = U_0(Z/Z_0)^{\alpha}; \tag{6}$$

出流面采用压力出口边界, 而建筑物表面和地面采用无滑移的壁面条件<sup>[7]</sup>.

对计算域采用了具有拓扑性的非结构四面体单元, 在靠近结构的壁面区域还对网格进行适当加密, 网格尺寸由内到外逐渐增大, 总计产生约 120 万个体单元.

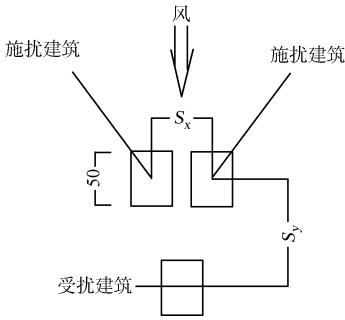


图 1 建筑物的平面布置图  
Fig. 1 Layout of building arrangement

2 干扰因子的数值模拟及分析

采用干扰因子<sup>[8-9]</sup>评估群体的静力干扰效应, 有

$$I_m = M_y/\dot{M}_y, \tag{7}$$

$$I_{cp} = C_p/\dot{C}_p. \tag{8}$$

式(7), (8)中:  $I_m, I_{cp}$  分别为受扰建筑平均基底弯矩干扰因子和平均风压系数干扰因子;  $M_y, \dot{M}_y$  分别为有、无干扰时的顺风向平均基底弯矩;  $C_p, \dot{C}_p$  分别为有、无干扰时的建筑表面点风压系数.

2.1 平均基底弯矩干扰因子

C 类地貌下, 受扰建筑平均基底弯矩干扰因子  $I_m$  的数值模拟结果, 如表 1 所示. 由表 1 可知, 当横风向间距较小(如  $S_x$  为  $1.5b, 2.0b$ )时, 干扰效应明显. 顺风向基底弯矩与无干扰时相比有较大的减小, 尤其是横风向间距为  $1.5b$  且顺风向间距为  $3.0b$  时减小最大, 达到了 0.320. 顺风向间距达到  $12.0b$  时, 干扰因子仍能达到 0.612 和 0.730, 干扰效应还是明显. 随着顺风向间距的增大, 干扰因子先减小后增大. 究其原因是, 施扰建筑形成的狭缝效应随着顺风向间距增大而减弱, 遮挡效应也减弱, 前者减弱速度较快.

在横风向间距  $S_x = 4.0b \sim 6.0b$  且顺风向间距  $S_y = 5.0b \sim 12.0b$  时, 干扰因子均在 1.0 左右. 表明, 施扰建筑在这些位置对受扰建筑几乎没有干扰作用. 在某些位置(如横风向间距  $S_x = 4.0b \sim 6.0b$  且顺风向间距  $S_y = 2.0b \sim 3.0b$ )干扰因子都大于 1, 这是由于施扰建筑形成狭缝效应, 使得作用在受扰建筑的气流加快, 加大了作用在受扰建筑上的静力风荷载作用.

综上所述可知, 干扰效果最好的位置是横风向距离在  $1.5b$  左右, 且顺风向距离在  $3.0b$  左右.

表 1 平均基底弯矩干扰因子随风向间距的变化规律

Tab. 1 Relationship between interference factor of mean base moment and wind spacing

$S_x$	$S_y$				
	2.0b	3.0b	5.0b	8.0b	12.0b
1.5b	0.401	0.320	0.425	0.510	0.612
2.0b	0.761	0.682	0.550	0.620	0.730
3.0b	0.965	0.890	0.872	0.799	0.884
4.0b	1.030	1.004	0.993	1.001	0.998
6.0b	1.064	1.025	0.996	0.989	1.000

2.2 平均风压系数干扰因子

为了全面研究干扰效果, 研究了横风向间距为  $1.5b$  时部分点的风压系数  $I_{cp}$  大小变化情况. 当横风向间距为  $1.5b, 2h/3$  的高度平面的风速矢量图, 如图 2 所示. 典型点的分布情况, 如图 3 所示. 施受

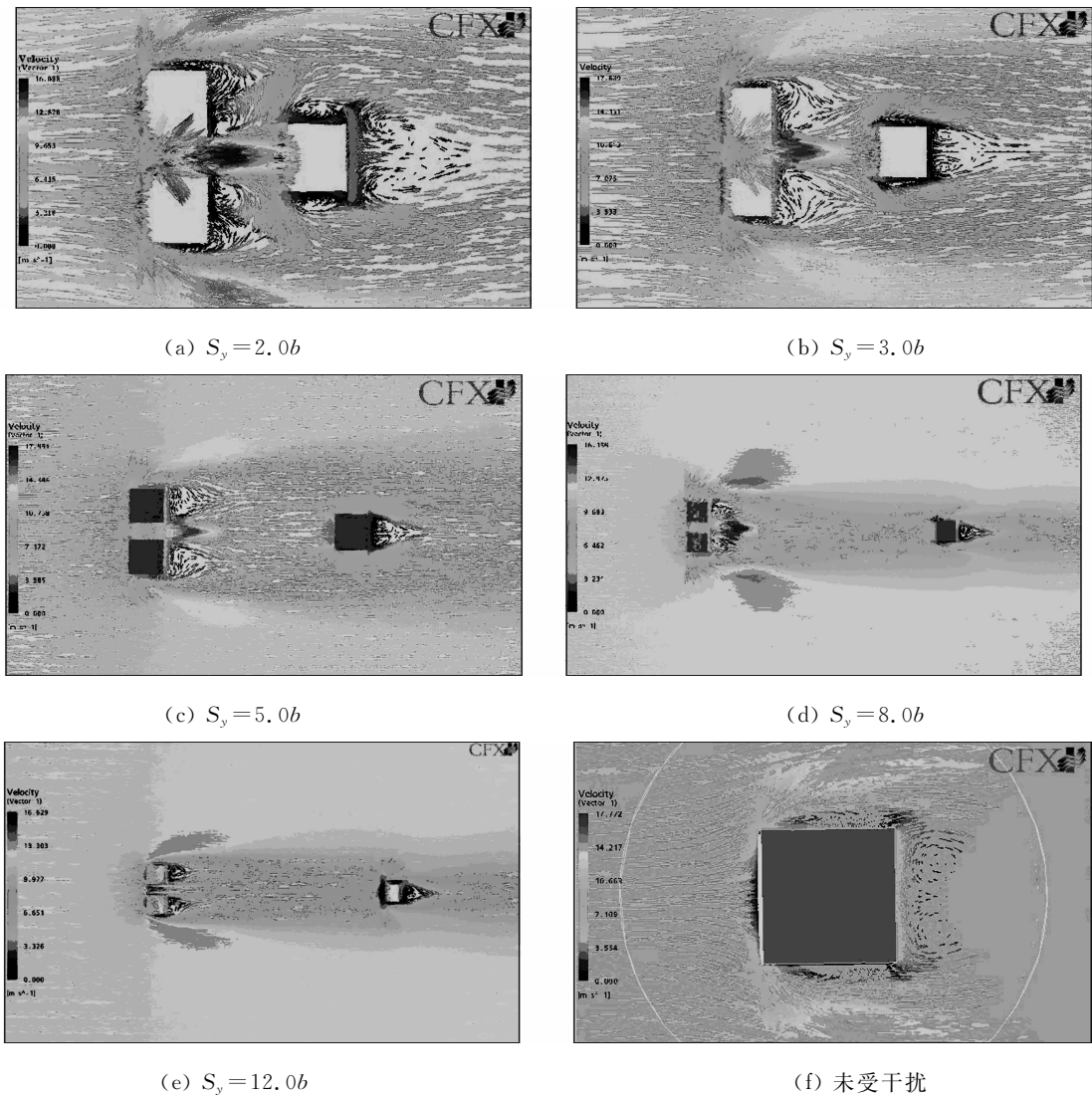


图 2 平面的风速矢量图  
Fig. 2 Vector of wind velocity

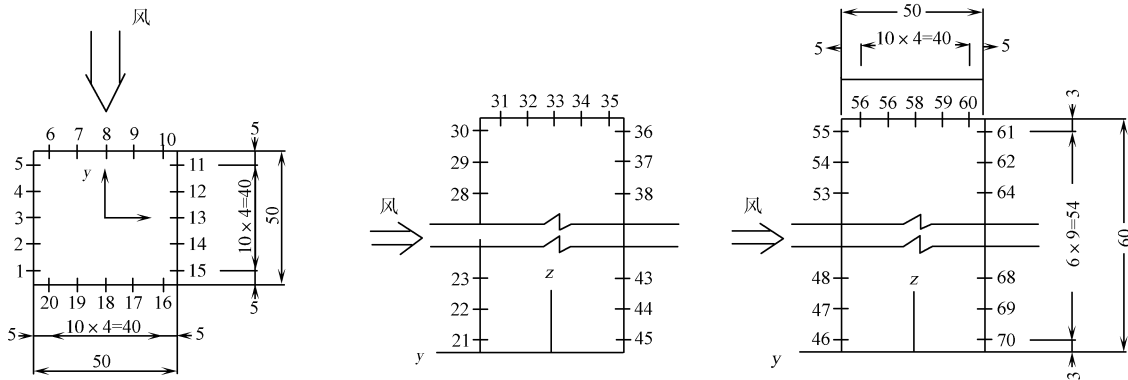


图 3 取点布置图(单位:m)  
Fig. 3 Layout of selected points(unit:m)

扰建筑不同位置时,点 1~70 的  $I_{cp}$  变化情况,如图 4 所示.由图 4 可知,在迎风面上,随着顺风向间距的增加, $I_{cp}$  都在增大( $S_y=2.0b$  除外),主要是施扰建筑的遮挡效应大幅减弱的缘故.

比较点 21~30 和点 46~55 可以看出,迎风面两边位置(纵剖面  $x=-20$ )比中间位置(纵剖面  $x=0$ )的  $I_{cp}$  要小,原因是两边位置前面有明显的遮挡.随着施扰建筑距离的增大,两边位置的  $I_{cp}$  增大逐渐加快,中间位置变化相对缓慢一点.在某一顺风向间距中,迎风面上半面  $I_{cp}$  较大,最大值出现在接近屋

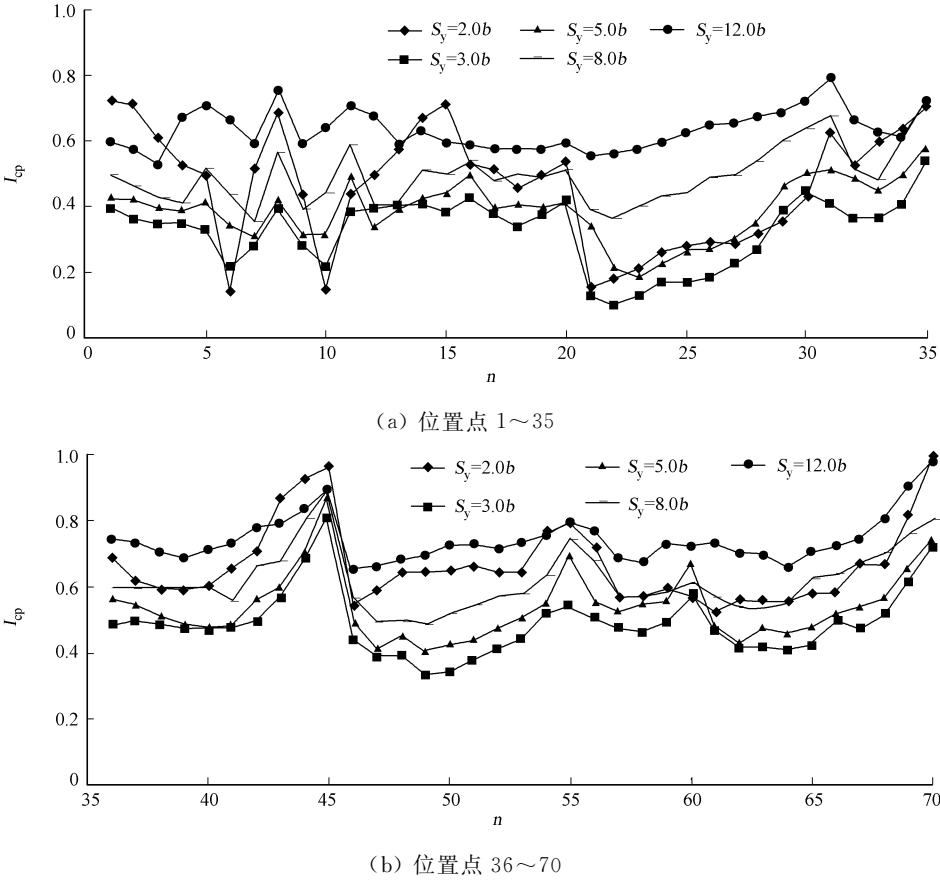


图 4 施扰建筑不同位置点的  $I_{cp}$  变化曲线

Fig. 4 Curves of  $I_{cp}$  at different location points of disturbed architecture

顶边缘位置,即点 30 和点 55. 在背风面上,  $I_{cp}$  值均较大, 随着顺风向间距的增加,  $I_{cp}$  都在增大 ( $S_y=2.0b$  除外). 这也是遮挡效应在减小的原因, 只是增大的速度比迎风面要小.

比较点 36~45 和点 61~70 可以发现, 背风面  $I_{cp}$  分布较为均匀, 中间位置稍小, 靠近地面位置略大. 如顺风向长度等于  $12.0b$  时, 点 70 的  $I_{cp}$  达到 0.987, 干扰效应不明显了.

在屋面上, 比较点 31~35 和点 56~60 可知, 随着顺风向间距的增加,  $I_{cp}$  也增加 ( $S_y=2.0b$  除外), 屋面两边位置 (纵剖面  $x=-20$ ) 变化幅度相对较大. 当顺风向间距较小时 ( $S_y=3.0b$  和  $S_y=5.0b$ ), 最大值出现在屋面后缘; 当顺风向间距较大时 ( $S_y=8.0b$  和  $S_y=12.0b$ ), 最大值出现在屋面前缘.

其原因是, 施扰建筑屋面气流分离后绝大部分都要在受扰建筑屋面上再附着, 其屋面的风压系数相对较均匀; 而建筑单独存在时 (未受干扰) 屋面前缘气流分离厉害, 前缘负压值很大, 整个面上风压梯度变化明显, 前缘位置  $I_{cp}$  要比后缘小; 而顺风向间距较大时, 前缘附着的气流会再次分离, 造成该处出现较大的负压峰值, 此处的  $I_{cp}$  也将较大.

屋面中间位置 (纵剖面  $x=0$ )  $I_{cp}$  较为均匀, 比屋面两边位置 (纵剖面  $x=-20$ ) 要略大一点. 在侧面上, 比较点 1~5 和点 11~15 可以看出, 随着顺风向间距的增大,  $I_{cp}$  也在增大 ( $S_y=2.0b$  除外), 面上不同位置有不同的  $I_{cp}$ , 与屋面分析一致. 当顺风向间距较小 ( $S_y=3.0b$ ,  $S_y=5.0b$ ) 时,  $I_{cp}$  最大值出现在侧面后缘; 当顺风向间距较大时 ( $S_y=8.0b$ ,  $S_y=12.0b$ ),  $I_{cp}$  最大值出现在侧面前缘.

对于顺风向间距等于  $2.0b$ , 它很多点的  $I_{cp}$  值都比顺风向间距等于  $3.0b$ ,  $5.0b$  的  $I_{cp}$  值, 甚至  $8.0b$  的  $I_{cp}$  值还要大. 这主要是两个施扰建筑距离较近, 形成狭缝效应更明显, 加快了气流的速度, 增大了静力风荷载效应, 故其值较大. 此外, 需指出的是, 随顺风向距离增大, 狭缝效应减弱得很快.

### 3 结论

(1) 随着计算机技术和数值方法的迅速发展, 数值模拟方法成为预测风荷载及其效应的一种新的

有效方法. 从长远看,该方法不仅能克服风洞试验的诸多局限性,而且可为建筑风场提供高效、准确的模拟结果. 数值模拟方法可以和风洞模型试验相结合,为工程抗风设计提供科学依据.

(2) 建筑物串联布置时且间距较小时,遮挡效应明显;斜列布置时,静力干扰效应减弱;建筑间并列布置时,容易发生狭缝效应,使得干扰效应在一定程度上表现为放大作用.

(3) 对于成品字形建筑群,下两建筑对上一建筑的干扰效应既有遮挡效应又有狭缝效应,分析这种建筑群干扰时要综合考虑两种效应的影响.

(4) 受扰建筑表面的  $I_{cp}$  分布沿高度和宽度的不同位置而变化显著. 对于迎风面,其值随着离地面高度的增加而增大,最大值往往出现在顶面位置处;背面的  $I_{cp}$  分布相对比较均匀,中间位置略小,靠近地面位置偏大;侧面和顶面上的  $I_{cp}$  分布规律与顺风向间距的大小有关.

参考文献：

[1] 李万平. 计算流体力学[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2004.  
[2] 杨洁,涂光备,易传雄. 设有空中花园的高层住宅建筑自然通风的研究[J]. 暖通空调,2004,34(4):1-5.  
[3] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2001:207-211.  
[4] 陈水福,焦烽. 低层四坡屋面房屋表面风压的数值模拟[J]. 浙江大学学报:工学版,2005,39(11):1653-1657.  
[5] PARTAKER S V. Numerical heat transfer and fluid flow[M]. New York:Hemisphere Publishing Co,1980.  
[6] 汤树勇,陈水福,唐锦春. 相邻高层建筑表面风压的数值模拟[J]. 计算力学学报,2004,21(2):159-163.  
[7] 张昕,齐辉,肖伟,等. 厦门国际会展中心多功能厅风压分布的数值模拟[J]. 结构工程师,2003,20(4),31-36.  
[8] 谢壮宁,顾明,倪振华. 群体高层建筑静力干扰效应的定量分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006,38(1): 149-152.  
[9] 郑朝荣,张耀春. 不同截面尺寸双柱体静力干扰效应的数值模拟[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(8):88-91.  
[10] 黄鹏. 高层建筑风致干扰效应研究[D]. 上海:同济大学,2001.  
[11] 李寿英,陈政清. 泉州中芸洲海景花园建筑群体的干扰效应研究[J]. 建筑结构学报,2008,29(2):19-24.  
[12] 顾明,黄鹏. 群体高层建筑风荷载干扰的研究现状及展望[J]. 同济大学学报:自然科学版,2003,31(7):762-766.

Numerical Simulation of Static Interference Effects for Buildings with ‘∴’ Arrangement

LIU Chun-yan, ZHANG Chun-hui, PENG Xing-qian

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The static interference effects of buildings with ‘∴’ arrangement and spatial distribution of wind pressure coefficient interference factor of interfered building surface is studied, the influence of the relative distance of building no static interference is analyzed. The results show: static interference is obvious when buildings arrangement string in line with small distance; static interference weakens gradually when buildings arrangement is in oblique line; narrow effect is prone to develop when buildings arrangement is in parallel. As for buildings with ‘∴’ arrangement, the lower two buildings show shield effect and narrow effect simultaneously to the upper building. The distribution of wind pressure coefficient interference factor of interfered building surface changes obviously along height and width.

**Keywords:** buildings with ‘∴’ arrangement; static interference effect; numerical simulation; interference factor; flow analysis

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)