

方形高层建筑顺风向层风力干扰特性

顾明, 葛福, 韩宁

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 利用刚性模型测压试验, 研究了受扰建筑层风力的干扰特性(所给出的是顺风向层风力干扰特性). 研究了施扰建筑在不同位置时, 受扰建筑的顺风向层风力沿高度分布情况, 以及层风力干扰因子沿高度分布情况, 得到了并列和串列工况的平均层风力干扰因子沿高度分布拟合公式. 结果表明, 随着施扰建筑位置变化, 层风力沿高度分布规律会发生变化, 干扰因子沿高度分布规律也会发生变化. 顺风向平均层风力干扰因子在某些位置达到 1.08 左右, 顺风向脉动层风力干扰因子在某些位置高达 1.5 以上.

关键词: 高层建筑; 干扰效应; 风力; 顺风向; 风洞试验

中图分类号: TU312.1; TU971

文献标志码: A

Characteristics of Along-wind Layer Wind Force Interference Effect of Two Square Tall Buildings

GU Ming, GE Fu, HAN Ning

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

Abstract: Layer wind force interference characteristic of disturbed building is studied by rigid model pressure test, and this paper presents the along-wind layer wind force interference characteristic. A study is made of the distribution of along-wind layer wind force and its interference factors by arranging interfering building in different positions. The fitting formulas describing the characteristic of along-wind mean layer wind force interference factors for side by side and tandem arrangement are obtained. The results show that the distribution laws of layer wind force and layer wind force interference factors change with the position of the interfering building. Maximum interference factors of along-wind mean layer wind force and root mean square(RMS) layer wind force are found to be 1.08 and above 1.5 respectively.

Key words: high-rise buildings; interference effects; wind force; along-wind; wind tunnel test

高层建筑的干扰效应研究一直是风工程界的热点问题, 由于邻近高层建筑的干扰作用, 相较于单体状况下受扰建筑物的风力可能会发生很大变化. 在过去的几十年里, 国内外对高层建筑的干扰效应作了大量研究. 文献[1]总结了 2003 年以前的干扰效应研究成果, 归纳了各个因素对干扰效应的影响规律. 2003 年之后, 又有了不少新的成果. 文献[2-6]在干扰效应方面研究得非常细致, 研究的对象是基底弯矩和基底弯矩响应, 得到了很多一般规律. 文献[7-8]研究了受扰建筑局部风压的干扰特性, 文献[9]也对局部风压干扰特性作了细致研究. 文献[10]利用数值方法研究了静力干扰效应.

目前的研究主要集中在基底力和局部风压方面, 也有少量的气弹模型试验研究, 但是, 尚未见对高层建筑层风力的干扰特性研究. 在研究方法上, 以整体基底力来定义干扰因子显得比较宏观, 不能更深一层认识干扰规律在结构上的分布; 以局部单个点的风压定义干扰因子, 显得比较局部, 有时候仅仅个别测点干扰因子特别大, 但是对结构整体影响不大. 而以建筑物受到的层风力来定义干扰因子, 对于更清晰地认识干扰机理和指导建筑设计具有重要意义, 同时也是对前人所做干扰工作的补充和发展. 本文对一般性方形受扰建筑, 在施扰建筑位置变化下的顺风向层风力干扰特性进行了详细研究, 得出了一些受扰建筑层风力干扰规律.

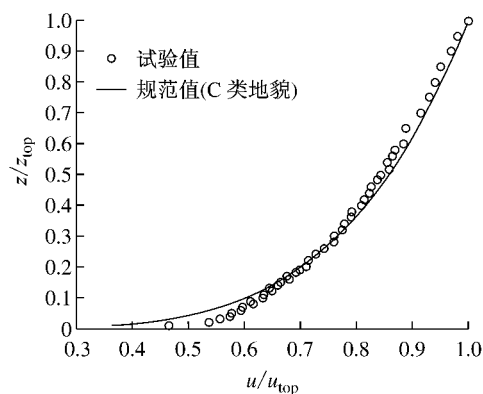
1 试验简介

1.1 试验设备及风场模拟

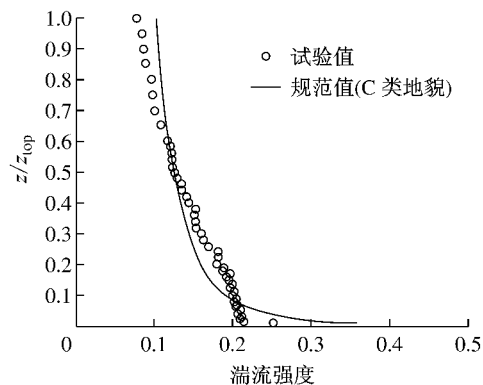
本试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室的 TJ-2 大气边界层风洞中进行. 该风洞为闭口回流式矩形截面风洞, 试验段尺寸为宽 3.0 m、高 2.5 m、长 15.0 m. 试验风速范围为 0.5~68.0 m·s⁻¹.

风压测量、记录及数据处理系统由电子式压力扫描阀系统、PC 机以及自编的信号采集及数据处理软件组成。

根据《建筑结构荷载规范(GB 5009—2012)》,在风洞中模拟了 C 类风场,几何缩尺比为 1:400,试验风速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。风速剖面图和湍流度剖面图见图 1。图中,圆圈为试验值,实线为规范值(由于我国规范尚未给出各类地貌的紊流度剖面,本图中采用日本规范 AIJ 2004^[11] 给出的紊流度公式)。图 1 中, z 为高度, z_{top} 为梯度风高度, u 为风速, u_{top} 为梯度风速。从图中可以看出,模拟的风场和理论值吻合得很好,符合研究要求。



a 风速剖面图



b 湍流度剖面图

图 1 风速和湍流度剖面图

Fig.1 Mean wind velocity profile and turbulence intensity profile of approaching wind

1.2 模型及试验安排

实验模型为一栋尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ 的方柱(受扰建筑),模拟一栋几何缩尺比为 1:400 的高层建筑。试验考虑了 3 种高度的施扰建筑,这 3 个施扰建筑模型的横断面与受扰模型相同,但高度分别为 $0.7H$, H 和 $1.3H$ (H 为受扰模型的高度)。限于篇幅,本文仅给出施扰建筑和受扰建筑等高的实验结果。施扰建筑和受扰建筑的位置见图

2。图中,坐标原点处为受扰模型,圆圈表示试验过程中施扰模型的位置, B 为受扰模型的宽度, X 为施扰模型与受扰模型顺风向距离, Y 为施扰模型与受扰模型横风向距离。

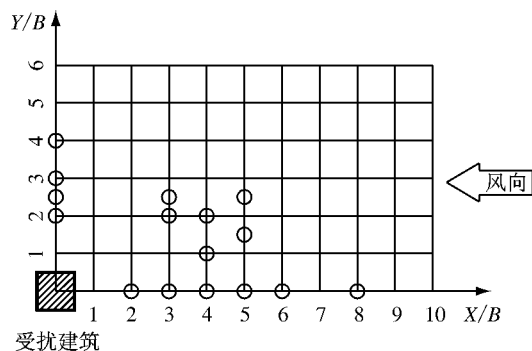


图 2 施扰模型位置布置图

Fig.2 Arrangement of buildings and coordinate system

1.3 层风力定义

模型沿高度共布置了 17 层测点,本文将模型沿高分成 17 层,最底层高度为 $0.265H$,最顶层高度为 $0.996H$,各层的具体分布如图 3 所示。层风力的正方向定义如图 4 所示。顺风向的平均层风力系数和脉动层风力系数分别记作 $C_D(z)$ 和 $C_D'(z)$,层风力系数定义为

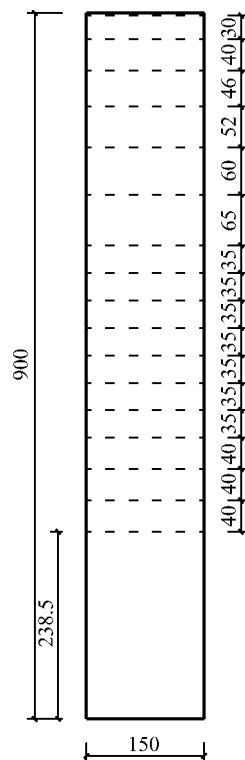


图 3 层分布图(单位:mm)

Fig.3 Distribution of layers(unit: mm)

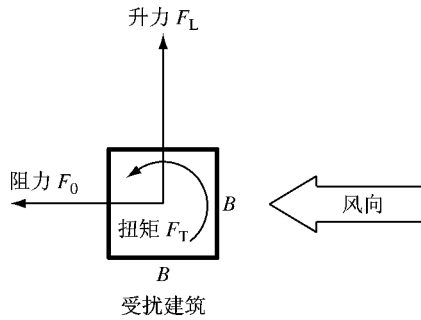


图4 风力正方向定义

Fig.4 Direction of wind force

$$C_D(z_i) = \frac{F_D(z_i)}{A(z_i)p_H}, \quad C'_D(z_i) = \frac{\sigma_D(z_i)}{A(z_i)p_H} \quad (1)$$

式中: $F_D(z_i)$ 为各层的顺风向平均风力; $\sigma_D(z_i)$ 为各层的顺风向脉动风力; p_H 为模型顶部的参考风压; $A(z_i)$ 为迎风面第 i 层的投影面积。

1.4 干扰效应量化方法

在分析干扰效应时,通常采用干扰因子(interference factor, IF)来评估施扰建筑对研究对象的影响。顺风向平均层风力干扰因子记作 I_{F,C_D} , 为有干扰时受扰建筑顺风向平均层风力系数与单体建筑顺风向平均层风力系数的比值;顺风向脉动层风力干扰因子记作 I_{F,C'_D} , 为有干扰时受扰建筑顺风向脉动层风力系数与单体建筑顺风向脉动层风力系数的比值。

2 结果分析

2.1 和其他研究成果比较

谢壮宁等^[2-5]作了大量的高层建筑干扰研究,给出了施扰模型与受扰模型相同工况下顺风向平均基底弯矩干扰因子分布。图5将本试验的结果与文献[5]的结果作了比较。

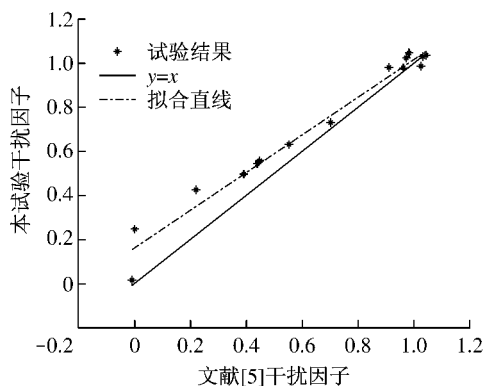


图5 与文献[5]的顺风向平均基底弯矩干扰因子比较

Fig.5 Comparison of IF of the along-wind mean base moment with Ref.[5]

图5中,横坐标为文献[5]的试验结果,纵坐标为本文的试验结果。文献[5]的试验数据是B类风场下测得的,而本试验是在C类风场中进行。对于顺风向平均基底弯矩干扰因子,文献[5]指出,D类风场的结果与B类风场的结果存在很好的回归关系。在图5中,本文C类风场下的结果与文献[5]中B类风场的结果也存在很好的回归关系,相关系数为0.99。从图5还可以看出,C类风场的干扰因子比B类风场的干扰因子大,表明C类风场的遮挡效应比B类风弱。文献[12]研究了不同湍流度下两个高层建筑干扰效应,指出静力干扰效应随着地貌粗糙程度的增加而降低,与图5结果一致。

2.2 施扰建筑位置变化的影响

施扰建筑的位置是影响干扰效应的一个主要因素。本文将施扰建筑位置分为建筑物并列、串列和斜列3种工况,对各个工况下受扰建筑的顺风向层风力干扰特性进行了研究。

2.2.1 建筑物并列时的干扰效应

图6给出了并列工况下顺风向层风力系数沿高度分布的情况。图中纵坐标 z/H 表示相对高度。从

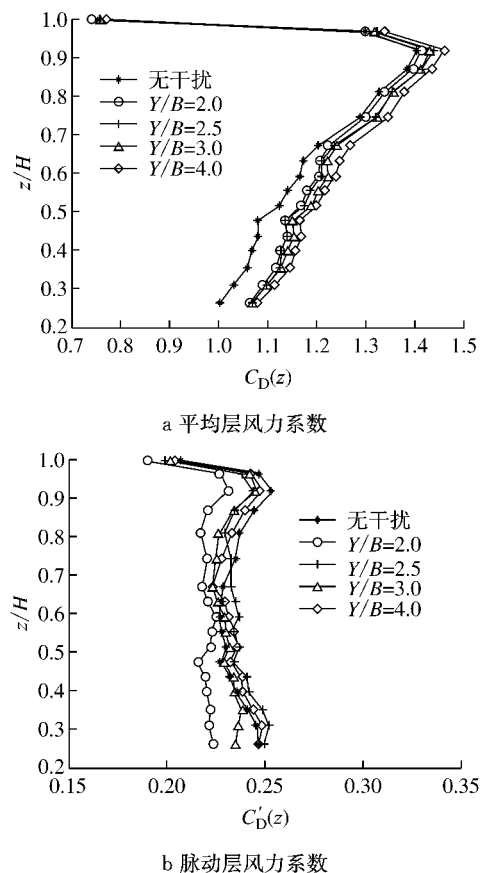


图6 并列工况下顺风向层风力系数沿高度分布图

Fig.6 Along-wind layer force coefficients distribution with the height(side by side)

图中可以看出,对于顺风向平均层风力,干扰效应规律明显,随着横向间距比增大,干扰效应增强.这是因为随着横向间距比增大,迎风面的平均风力变化不大,而背风面吸力增大,导致顺风向平均层力增大.当然,这种规律是在横向间距大于一个临界值(2.0)时才成立.陈素琴等^[13]指出,当间距比超过该临界值时,建筑物后的流体形态由偏态流变为双稳态流,背风面气动力特征趋于稳定.对于顺风向脉动层风力,干扰效应不明显,只有 $Y/B=2.0$ 时各层的层风力系数稍微小一些,具体各层干扰因子见图 7.

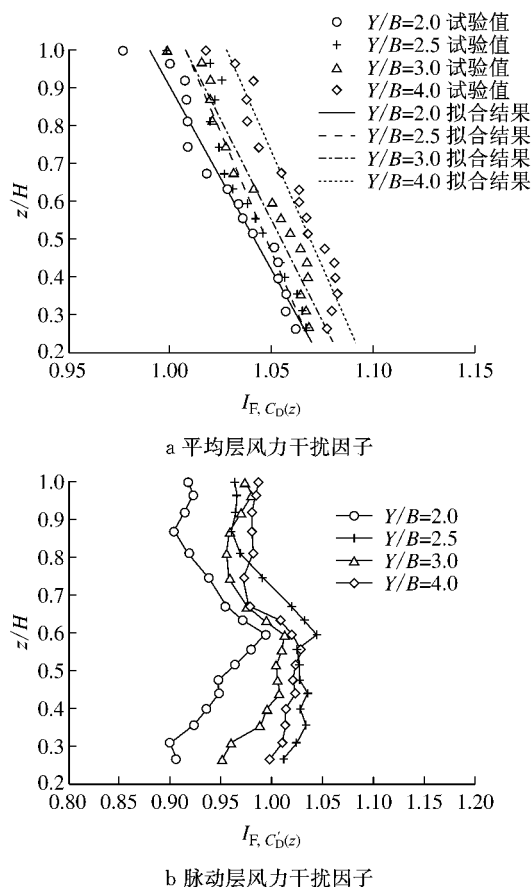


图 7 并列工况下顺风向层风力干扰因子沿高度分布图

Fig.7 Along-wind layer force interference factors(side by side)

图 7 给出了并列工况下各层风力干扰因子沿高度的分布.对于静力干扰效应,在试验工况范围内干扰因子在各层都是随横向间距比增大而增大,在沿高度分布上,干扰因子随高度而减小,底部干扰因子最大,顶部最小.横向间距为 2.0 时,顶层的干扰因子小于 1,其余各个位置各层的干扰因子都大于 1,最大值为 1.09.对于动力干扰效应,在 0.78H 高度以下,各层的干扰因子 $I_{F,Y/B=2.0} < I_{F,Y/B=3.0} < I_{F,Y/B=4.0} < I_{F,Y/B=2.5}$,顺风向脉动层风力干扰因子最小值为 0.9 左右,最大值为 1.05 左右;0.78H 高度

以上、0.87H 高度以下, $I_{F,Y/B=2.0} < I_{F,Y/B=3.0} < I_{F,Y/B=2.5} < I_{F,Y/B=4.0}$;0.87H 高度以上,各层干扰因子 $I_{F,Y/B=2.0} < I_{F,Y/B=2.5} < I_{F,Y/B=3.0} < I_{F,Y/B=4.0}$,干扰因子最小值为 0.9 左右,最大值在 0.98 左右.

并列工况顺风向平均层风力干扰因子沿高度分布可以用线性函数来表达,表达式为

$$I_{F,C_D(z)} = p_1 \left(\frac{z}{H} \right) + p_2 \quad (2)$$

式中: $I_{F,C_D(z)}$ 为顺风向平均层风力干扰因子; p_1 和 p_2 为拟合参数; z/H 为相对高度.采用最小二乘法进行参数拟合,拟合结果与试验结果相关系数均大于 0.95.各个位置拟合函数参数取值见表 1.从表 1 中可以看出,相对高度与干扰因子的相关系数都很大,表明线性关系明显,拟合结果见图 7a.

表 1 并列工况平均层风力干扰因子函数拟合参数取值

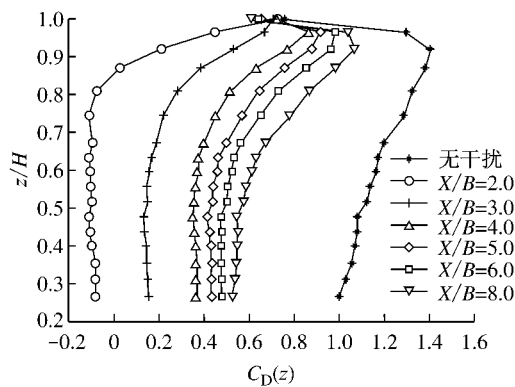
Tab.1 Parameter value of mean layer force IFs function fitting(side by side)

Y/B	p_1	p_2	相关系数
2.0	-0.103 6	1.093 4	-0.973 0
2.5	-0.079 7	1.087 4	-0.961 2
3.0	-0.094 9	1.102 1	-0.967 0
4.0	-0.083 6	1.111 0	-0.962 1

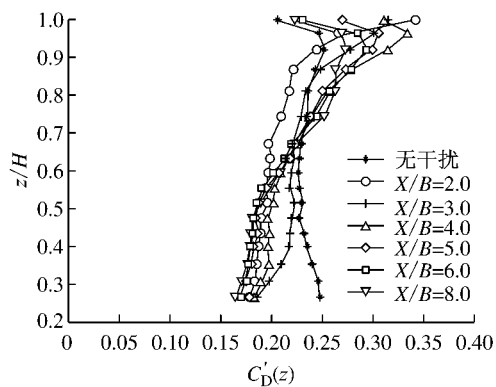
图 7b 表明,并列工况下顺风向脉动层风力干扰因子沿高度变化受两栋建筑之间距离的影响.干扰因子在高度上分布是 0.6H 高度处最大,向上或者向下各层脉动层风力干扰因子都减小,干扰因子在间距比 2.5、高度 0.6H 处取得最大值 1.05.总的来说,无干扰建筑的顺风向脉动层风力沿高度变化不大,其值大约在 0.22 至 0.25 之间,受周边建筑干扰后,受扰建筑上部顺风向脉动层风力减小,多数位置下部顺风向脉动层风力增大.

2.2.2 建筑物串列时的干扰效应

图 8 给出了串列工况下层风力系数沿高度分布情况.从图中可以看出,对于顺风向静力干扰效应,主要为遮挡效应,各层顺风向平均层风力系数都比无干扰时小,随着间距减小,遮挡效应加强,在 $X/B=2.0$ 时,受扰模型 0.8H 以下甚至受到吸力.谢壮宁等^[2-5]在研究顺风向基底力干扰效应时,也指出了“存在 $I_F < 0$ 的区域”.韩宁等^[14]在研究顺风向局部风压干扰效应时,也发现“间距比小于 3.0 时迎风面绝大部分干扰因子为负值”.各层的顺风向平均层风力干扰因子见图 9.对于顺风向动力干扰效应,0.7H 以下,各层顺风向均方根层风力系数均减小;0.7H 以上,当 $X/B > 3.0$ 时,各层顺风向均方根层风力系数比无干扰时要大.



a 平均层风力系数

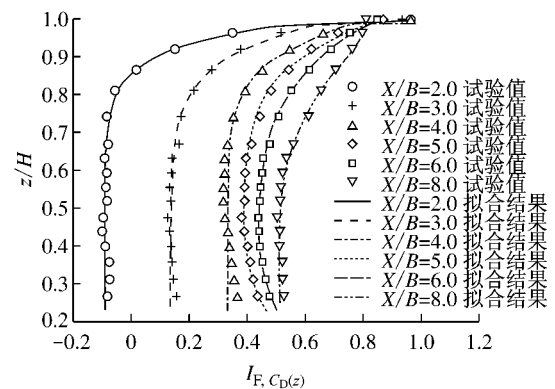


b 脉动层风力系数

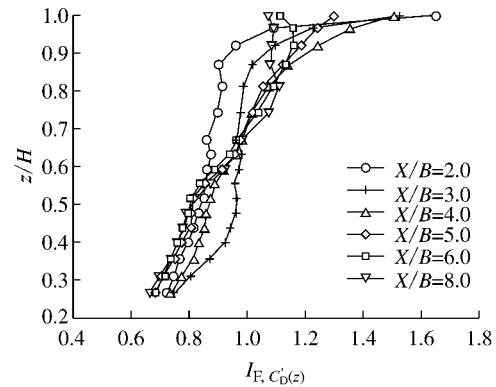
图8 串联工况下顺风向层风力系数沿高度分布图

Fig.8 Along-wind layer force coefficients with the height(tandem)

图9给出了串联工况下层风力干扰因子沿高度的分布情况.从图9中可以看出,顺风向静力干扰因子均小于1,表明干扰效果主要为遮挡效应,并且可以看出,各层干扰因子均随间距比减小而减小,当 $X/B=2.0$ 时,受扰建筑 $0.8H$ 以下干扰因子为负值,为 -0.1 左右.受扰模型下部遮挡效应比上部严重,在模型高度 $0.6H$ 以下,顺风向平均层风力干扰因子沿高度基本无变化;自 $0.6H$ 往上,顺风向平均层风力干扰因子逐渐增大直至顶层,各位置顶层顺风向平均层风力干扰因子随间距比变化不大,为 0.9



a 平均层风力干扰因子



b 脉动层风力干扰因子

图9 串联工况下顺风向层风力干扰因子沿高度分布图

Fig.9 Along-wind layer force interference factors with the height(tandem)

左右.

观察发现,顺风向平均层风力干扰因子沿高度分布图形与指数函数类似,于是对其分布函数进行了拟合,拟合的函数形式为

$$I_{F,C_D(z)} = p_1 \left(\frac{z}{H} \right)^{a_1} + p_2 \left(\frac{z}{H} \right)^{a_2} + p_3 \quad (3)$$

式中: $I_{F,C_D(z)}$ 为顺风向平均层风力干扰因子; p_1, p_2, p_3, a_1, a_2 均为拟合参数.采用最小二乘法进行参数拟合,拟合结果与试验结果相关系数均大于 0.95 .各参数随串联间距比的取值见表2,拟合结果见图9a.

表2 串联工况平均层风力干扰因子函数拟合参数取值

Tab.2 Parameter value of mean layer force IFs function fitting(tandem)

X/B	p_1	a_1	p_2	a_2	p_3
2.0	0.728 98	13.444 24	1.929 16	417.865 05	-0.089 16
3.0	0.530 77	9.177 66	0.473 92	121.945 47	0.135 71
4.0	0.495 21	10.074 94	0.671 49	373.584 60	0.333 16
5.0	0.000 39	-3.650 66	0.477 63	8.039 86	0.386 93
6.0	0.002 02	-2.528 98	0.431 57	5.825 60	0.422 93
8.0	-334.952 97	8.573 05	335.251 54	8.565 10	0.512 33

对于顺风向动力干扰效应,在受扰建筑高度 $0.7H$ 以下,干扰因子均小于1,最小为 0.65 左右;

在受扰建筑高度 $0.7H$ 以上,当间距比大于一定值(3.0)时,干扰因子大于1,最大可达 1.5 以上.

2.2.3 典型斜列工况下的干扰效应

图 10 给出了斜列工况下层风力系数沿高度的分布情况. 从图中可以看出, 对于顺风向平均层风力系数, 当 $Y/B > 2.0$ 时, 层风力系数沿高度分布规律与并列工况相似; 当 $Y/B < 1.5$ 时, 层风力系数沿高度分布规律与串列工况相似. 对于顺风向脉动层风力系数, 也是当 $Y/B < 1.5$ 时干扰效应突出, $Y/B > 1.5$ 的位置顺风向脉动层风力系数虽然随位置有所变化, 但是幅度不大.

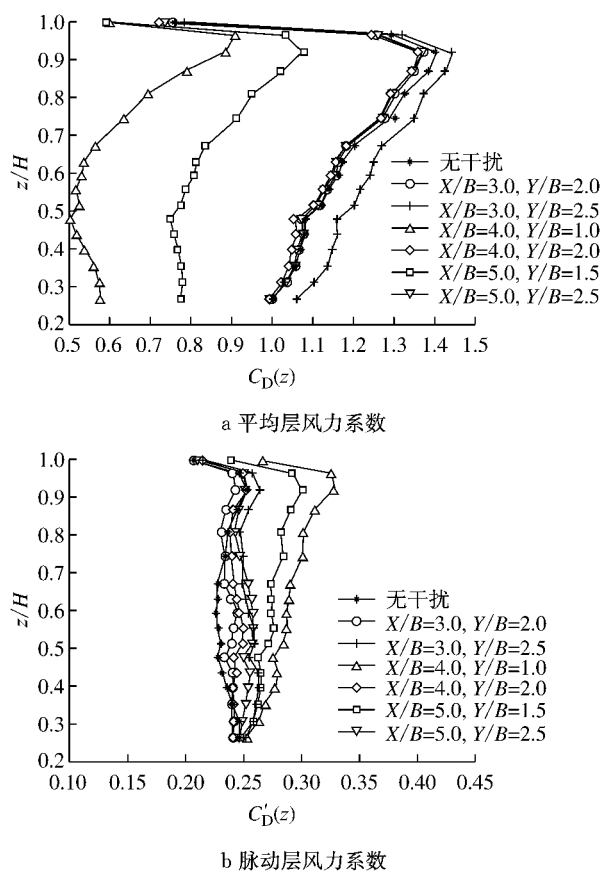


图 10 斜列工况下顺风向层风力系数沿高度分布图

Fig. 10 Along-wind layer force coefficients with the height (oblique)

斜列工况下层风力干扰因子沿高度分布见图 11, 对于平均层风力, 横向间距对于干扰因子的分布规律起主要作用. 当 $Y/B < 1.5$ 时, 各层干扰因子均小于 1, 干扰效果体现为遮挡效应; 当 $Y/B > 2.0$ 时, 除了 $X/B=3.0, Y/B=2.5$ 位置, 其余各位置各层平均层风力干扰因子基本相等, 沿高度线性分布, 顶部略小于 1, 为 0.97 左右, 底部等于 1, 这表明, 在这些位置, 平均层风力干扰效应不明显. $X/B=3.0, Y/B=2.5$ 位置的平均层风力干扰效应最大, 其最大值约为 1.08, 受扰建筑下半部分的平均层风力干扰略大, 上半部分略小, 所有层的平均层风力干扰因

子均大于 1.

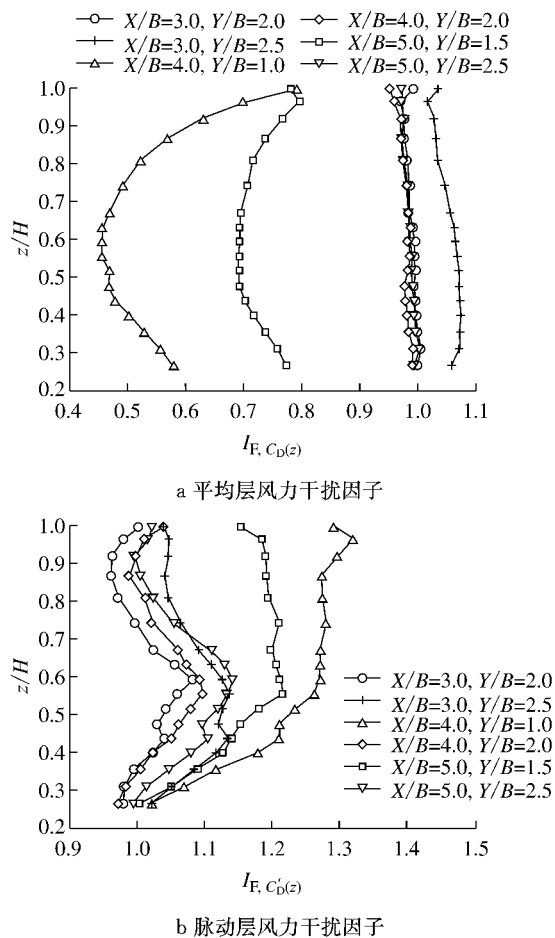


图 11 斜列工况下顺风向层风力干扰因子沿高度分布图

Fig. 11 Along-wind layer force interference factors with the height (oblique)

图 11b 表明, 横向间距对于脉动层风力干扰因子的分布也起到了控制性作用. 当 $Y/B < 1.5$ 时, 干扰效应较大, 各位置各层的干扰因子都大于 1.0, 在 $X/B=4.0, Y/B=1.0$ 位置处, 脉动层风力干扰因子各层均比其他位置大, 顶部取得最大值, 为 1.32 左右; 当 $Y/B > 2.0$ 时, 脉动层风力干扰因子沿高度分布的形状基本相似, 类似于并列工况, 干扰因子都是底部和顶部略小, 0.6H 高度附近最大.

3 结论

(1) 在周边建筑物干扰下, 受扰建筑的顺风向层风力系数沿高度分布状况会发生很大变化. 受扰建筑的层风力干扰因子沿高度的分布规律与施扰建筑位置密切相关.

(2) 本文给出了并列和串列工况下的顺风向平均层风力干扰因子沿高度分布的拟合公式. 斜列布

置时,施扰建筑的横向间距比起控制作用,横向间距比小于1.5时,静力干扰因子沿高度分布规律与串列工况相似,各层静力干扰因子均小于1,表现为遮挡效应,干扰因子沿高度是先减小后增大。横向间距比大于2.0时,静力干扰因子沿高度分布规律与并列工况相似,各层干扰因子在1附近,沿高度静力干扰因子是下部略大,上部略小。

(3)顺风向动力干扰因子,随位置变化较大,并列布置时,顺风向脉动层风力干扰因子在中间(0.6H高度)取得最大值,向上和向下都减小;串列布置时,脉动层风力干扰因子在顶部取得最大值,底部取得最小值,某些位置顶部脉动层风力干扰因子达到1.5以上;斜列布置时横向间距比起控制作用,横向间距比小于1.5,干扰效应较严重,各层的干扰因子较大,最大可达1.32,横向间距比大于2.0,干扰因子分布规律与并列布置相似。

(4)本文仅研究了结构直接受到的顺风向风荷载,在知道结构动力特性的情况下,可以进一步研究等效静力风荷载的干扰效应,此工作有待展开。

参考文献:

- [1] 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.
GU Ming, HUANG Peng. Research history and state-of-art of interference effects of wind loads of a cluster of tall buildings[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003,31(7): 762.
- [2] 谢壮宁,顾明,倪振华. 任意排列三个高层建筑间顺风向动力干扰效应的试验研究[J]. 工程力学,2005,22(5): 136.
XIE Zhuangning, GU Ming, NI Zhenhua. Experimental study of along-wind dynamic interference effects among three arbitrarily arranged tall buildings[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(5): 136.
- [3] XIE Zhuangning, GU Ming. Mean interference effects among tall buildings[J]. Engineering Structures, 2004, 26(9): 1173.
- [4] XIE Zhuangning, GU Ming. 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.
- [5] 谢壮宁,顾明. 任意排列双柱体的风致干扰效应[J]. 土木工程学报,2005,38(10): 32.
XIE Zhuangning, GU Ming. Wind-induced interference effects between two arbitrarily arranged prisms[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(10): 32.
- [6] 谢壮宁,顾明,倪振华. 三并列方柱风荷载特性的试验研究[J]. 西安交通大学学报,2003,37(3): 290.
XIE Zhuangning, GU Ming, NI Zhenhua. Experimental study of wind load on three square prisms of side-by-side arrangements[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(3): 290.
- [7] 韩宁,顾明. 两串列方柱局部脉动风压干扰研究:第1部分迎面效应[J]. 振动与冲击,2009,28(12): 188.
HAN Ning, GU Ming. Interference effects on local fluctuating pressure of two square tall buildings in tandem arrangement: part I windward side effects[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009,28(12): 188.
- [8] 韩宁,顾明. 两并列方形高层建筑局部风压干扰特性[J]. 同济大学学报:自然科学版,2011,39(10): 1441.
HAN Ning, GU Ming. Interference effects on wind pressure of two square tall buildings in side-by-side arrangement[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011,39(10): 1441.
- [9] 朱剑波. 群体超高层建筑的风压分布特征[D]. 广州:华南理工大学,2011.
ZHU Jianbo. Distribution characteristics of wind pressures on tall buildings[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [10] 杨伟,黄鹏,顾明. 高层建筑风致静力干扰效应的试验和数值研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(2): 152.
YANG Wei, HUANG Peng, GU Ming. Experimental and numerical study on wind-induced mean interference effects on two tall buildings[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(2): 152.
- [11] AIJ. Recommendation for loads on buildings[S]. [S. l.]: Architectural Institute of Japan, 2004.
- [12] 石碧青,洪海波,谢壮宁. 高湍流度风场中两个高层建筑间的风干扰效应[J]. 力学季刊,2008,29(4): 615.
SHI Biqing, HONG Haibo, XIE Zhuangning. Wind interference between two tall buildings in high turbulence boundary flow[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2008, 29(4): 615.
- [13] 陈素琴,顾明,黄自萍. 两并列方柱绕流相互干扰的数值研究[J]. 应用数学和力学,2000,2(2): 131.
CHEN Suqin, GU Ming, HUANG Ziping. Numerical computation of the flow around two square cylinders arranged side by side[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2000, 21(2): 131.
- [14] 韩宁,顾明. 两串列方形高层建筑局部风压干扰特性分析[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(5): 13.
HAN Ning, GU Ming. Characteristics of interference effects on local pressure of two square tall buildings in tandem arrangement[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(5): 13.