

方形高层建筑横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受扰建筑层风力的干扰特性, 研究了施扰建筑在不同位置时受扰建筑的横风向层风力沿高分布情况以及其干扰因子沿高分布情况, 给出了并列和串联时的脉动层风力系数沿高分布拟合公式. 结果显示, 施扰建筑可能会使受扰建筑横风向平均层风力不再为零, 横风向脉动层风力沿高分布情况及其干扰因子沿高分布情况与施扰建筑位置关系密切, 脉动层风力干扰因子最大可达 2.26.

关键词: 高层建筑; 干扰效应; 风力; 横风向; 风洞试验

中图分类号: TU312.1; TU971

文献标志码: A

Characteristics of Across-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 across wind layer wind force interference characteristic. Distribution of across wind layer wind force and its interference factors with interfering building arranged in different position is considered, fitting formulas describing the characteristic of across wind root mean square(RMS) layer wind force coefficients for side by side and tandem arrangement are obtained. The results show that interfering building probably leads to the across wind mean layer force's deviation from zero, across wind RMS layer force interference factors can reach up to 2.26.

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

柔性方向发展, 其抗风问题日益成为热点, 特别是群体高层建筑, 其风力可能与单体状况相差很大. 对于高层建筑的干扰效应, 文献[1]对 2003 年以前的研究成果进行了综述, 系统总结了各个因素对干扰效应的影响, 之后, 还有不少人做过干扰方面的研究^[2-8]. 前人的研究大都集中在局部风压的干扰效应和基底力及基底力响应的干扰效应, 或者以工程项目为背景研究干扰效应, 也有少量的气弹试验研究干扰效应, 但尚未涉及层风力的干扰效应.

以局部风压为对象研究干扰效应可以用于维护结构设计, 但是不能用到整体结构设计中, 因为可能局部测点的干扰因子很大, 但是对整体影响不大; 以基底力或基底力响应为对象研究干扰效应比较宏观, 不能认识到干扰因子在高度上的分布, 而以层风力为对象视角比较适中, 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.

本文针对一般性方形受扰建筑, 以横风向层风力为对象, 研究受扰建筑横风向的干扰效应, 给出横风向平均层风力系数沿高分布情况、横风向脉动层风力系数沿高分布及其干扰因子沿高分布, 得到一些横风向层风力干扰规律.

1 试验简介

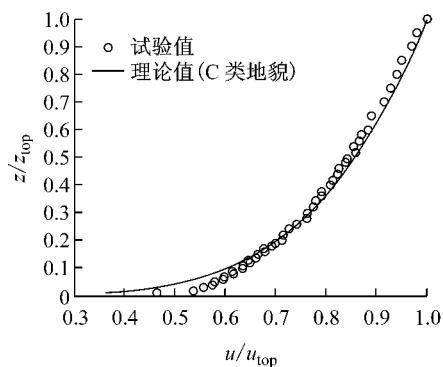
1.1 试验设备及风场模拟

试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 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 m. 根据国家规范^[9], 在风洞中模拟了 C 类风场, 几何缩尺比为 1:400, 试验风速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

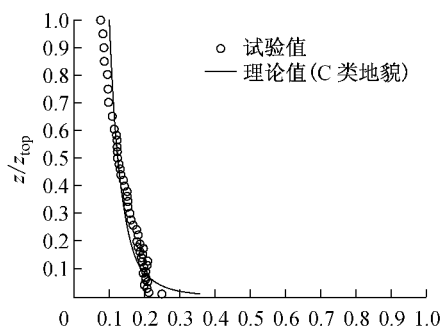
风速剖面图和湍流度剖面图见图 1, 由于做试验时我国规范尚未给出各类地貌的紊流度剖面, 图中的理论值采用日本规范 AIJ2004^[10] 给出的紊流度公

随着经济发展, 建筑不断向低阻尼、轻质量和高

式进行计算. 图中 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, 模拟风场的试验值和理论值吻合得很好, 符合研究要求.



a 平均风速剖面



b 湍流强度剖面

图 1 风速和湍流强度剖面

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

1.2 模型及试验安排

试验模型为一栋长、宽、高分别为 150 mm, 150 mm, 900 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, 仅给出施扰建筑和受扰建筑等高的试验结果. 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.

1.3 层风力定义

模型沿高度共布置了 17 层测点, 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, 图中 F_L 为升力, F_D 为阻力, F_r 为扭矩. 横风向的平均层风力系数

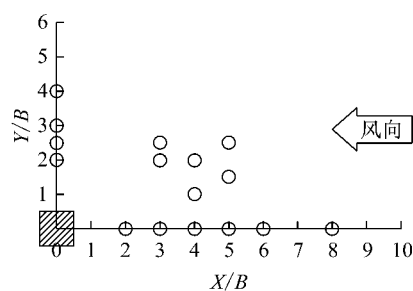


图 2 施扰模型位置布置

Fig.2 Arrangement of buildings and coordinate system

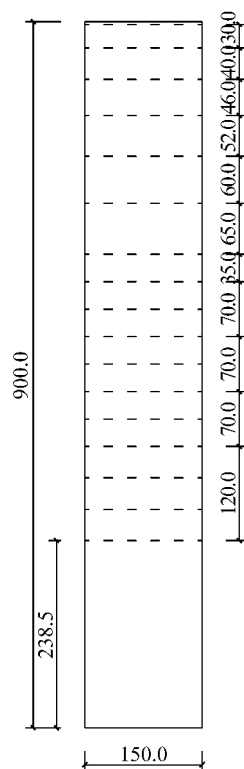


图 3 层分布(单位:mm)

Fig.3 Distribution of layers

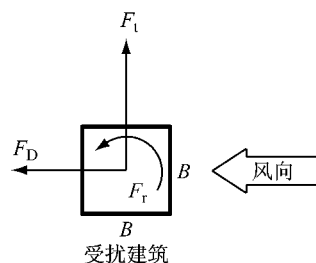


图 4 风力正方向定义

Fig.4 Direction of wind force

和脉动层风力系数分别记作 $C_L(z)$ 和 $C'_L(z)$, 第 i 层的 2 种层风力系数分别定义为

$$C_L(z_i) = \frac{F_L(z_i)}{A(z_i)P_H} \quad (1)$$

$$C'_L(z_i) = \frac{\sigma_L(z_i)}{A(z_i)P_H} \quad (2)$$

式中: $F_L(z_i)$ 为第 i 层的横风向平均层风力; $A(z_i)$ 为迎风面第 i 层的投影面积; P_H 为模型顶部的参考风压; $\sigma_L(z_i)$ 为第 i 层的横风向层风力均方根。

1.4 干扰效应量化方法

通常采用干扰因子(interference factor, IF)来评估干扰效应. 单体工况时, 由于结构对称, 横风向平均层风力接近零, 通常研究横风向的干扰效应只计算横风向脉动层风力干扰因子 $I_{F(C'_L(z))}$, 定义为有干扰时受扰建筑横风向脉动层风力系数与单体建筑横风向脉动层风力系数的比值。

2 结果及分析

影响干扰效应的因素有很多, 毫无疑问施扰建筑的位置是一个重要的影响因素. 施扰建筑位置变化则受扰建筑的干扰规律会发生变化. 将施扰建筑位置分为建筑物并列、串列和斜列三类工况, 对各类工况下受扰建筑的层风力干扰特性进行研究。

2.1 建筑物并列时的干扰效应

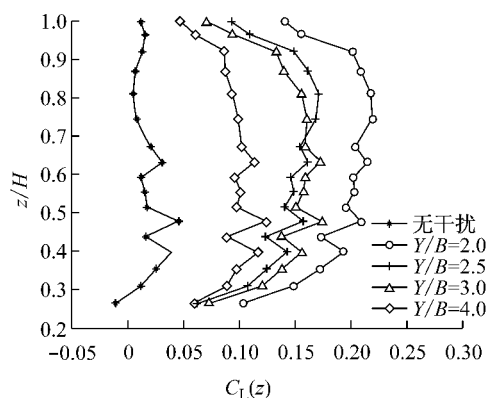
图5给出了并列工况下横风向层风力系数沿高分布情况, 图中 z/H 为相对高度. 从图5a可以看出, 无干扰时 $C_L(z)$ 基本为零, 受到干扰后 $C_L(z)$ 变大, 表明建筑物相吸, 并且间距比越小干扰效应越严重, 这是因为两建筑物并列时产生了峡谷效应, 并列间距越小, 峡谷气流越快, 吸力越大. 间距比为2.0时, 各层 $C_L(z)$ 为0.20左右; 间距比为2.5和3.0的各层 $C_L(z)$ 比较接近, 为0.15左右; 间距比为4.0时, 各层 $C_L(z)$ 为0.10左右. 图5b表明, 横向间距比对 $C'_L(z)$ 的干扰规律十分明显, 间距比小于3.0时, $C'_L(z)$ 比无干扰时小, 间距比越小, 各层 $C'_L(z)$ 越小; 间距比等于4.0时, 各层 $C'_L(z)$ 比无干扰时大. $C'_L(z)$ 沿高度分布规律相似, 均是沿高度向上先增大后减小, 在0.6H高度处取得最大值。

对建筑物并列时 $C'_L(z)$ 沿高分布进行公式拟合, 拟合函数形式为

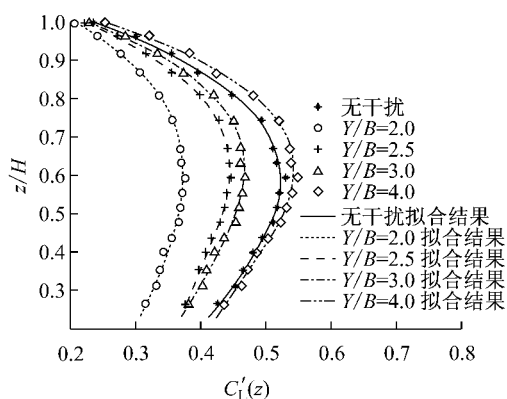
$$C'_L(z) = p_1 \left(\frac{z}{H} \right)^{\alpha_1} + p_2 \left(\frac{z}{H} \right)^{\alpha_2} + p_3 \quad (3)$$

式中: p_1, p_2, p_3 为拟合的系数参数; α_1, α_2 为拟合的指数参数. 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. 式中各参数随并列间距比的取值见表1, 拟合结果见图5b。

对单体对称建筑而言, 通常不考虑横风向平均风力(横风向平均风力很小, 通常予以忽略). 但当目标建筑附近有另一高度相近的建筑时, 则不能忽略横风向平均风力的作用。



a 平均层风力系数



b 脉动层风力系数

图5 并列工况下横风向层风力系数

Fig.5 Across-wind layer force coefficients(side by side)

表1 不同工况脉动层风力系数函数拟合参数取值

Tab.1 Parameter value of RMS layer force coefficients function fitting(side by side)

工况	p_1	α_1	p_2	α_2	p_3
单体工况	0.83	1.51	-0.93	3.06	0.33
并列 工况	Y/B=2.0	0.31	1.11	-0.35	3.83
	Y/B=2.5	117.15	2.78	-117.28	2.79
	Y/B=3.0	0.42	1.14	-0.48	4.12
	Y/B=4.0	92.18	2.52	-92.30	2.54

从图6可以看出, 横向间距比对干扰因子的影响十分明显, 随着横向间距比增大, 各层干扰因子的数值增大, 间距比小于3.0时, 各层干扰因子均小于1.00. 间距比为4.0时, 各层干扰因子均大于1.00, 最大为1.08左右. 对同一层内外侧面, 研究单点脉动值以及点-点之间相关性, 结果表明: 间距比较小时, 由于峡谷效应, 侧面的风速很大, 脱落的漩涡尺寸较小, 单点的脉动较强, 但是同一层各点的风压相关性较弱, 导致整个层的脉动较弱; 当间距比增大时, 漩涡尺寸增大, 整个层各个点风压相关性增大, 导致整个层的脉动层风力增大。

图6表明, 施扰建筑并不总是增大横风向脉动层风力, 只有间距比大于4.0, 受扰建筑的脉动层风

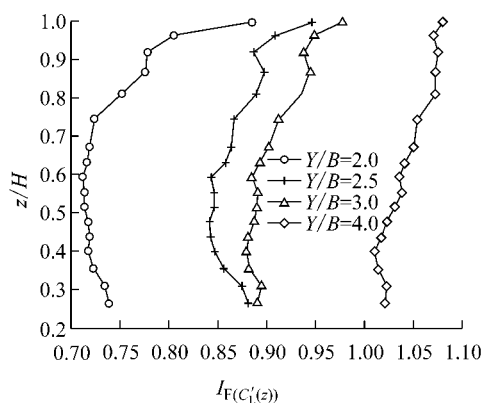


图 6 并列工况横风向脉动层风力系数干扰因子

Fig. 6 IF of RMS coefficients of across-wind layer force(side by side)

力才会比无干扰时大. 这与单个测点的风压干扰因子不同, 并列布置时内外侧面的测点脉动风压系数干扰因子均在间距比最小时取得最大值^[5].

横风向脉动层风力干扰因子沿高度变化总体上是下部小、上部大. 间距比为 2.0 时, $0.7H$ 以下各层干扰因子沿高度变化很小, $0.7H$ 以上各层干扰因子随高度增加大幅增加; 其余间距比情况下, 各层干扰因子沿高度变化幅度不大. 这可能是因为间距比较小时, 顶部由于三维流效应, 干扰较强, 横风向脉动层风力干扰因子沿高变化大, 而间距比较大时, 干扰减弱, 所以脉动层风力干扰因子沿高度变化不大.

2.2 建筑物串列时的干扰效应

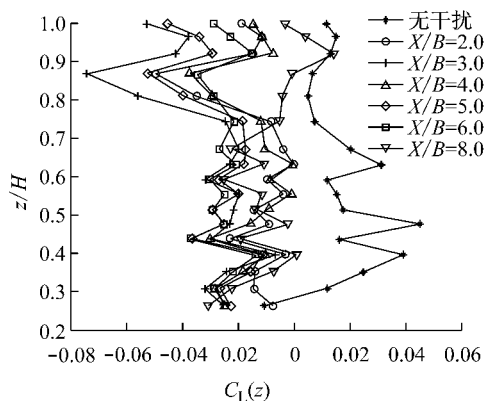
图 7a 表明, 顺风向间距比对横风向平均层风力影响不大, 在各种间距比下各层 $C_L(z)$ 都接近零. 图 7b 表明, 施扰建筑的存在使受扰建筑的 $C_L'(z)$ 发生很大变化, 受扰建筑 $0.75H$ 高度以下的 $C_L'(z)$ 比无干扰时小, 顶部的 $C_L'(z)$ 比无干扰时大. 这是因为串列布置时, 施扰建筑对后面的受扰建筑存在遮挡效应, 并且下部的遮挡效应比顶部严重, 从而减弱了受扰建筑横风向的漩涡脱落, 导致受扰建筑下部的 $C_L'(z)$ 比无干扰时小; 受扰建筑顶部 $C_L'(z)$ 比无干扰时大, 是因为从施扰建筑顶部分离的尾流增加了受扰建筑顶部来流流速和湍流程度.

对建筑物串列时 $C_L'(z)$ 沿高分布进行公式拟合, 由于串列下 $C_L'(z)$ 沿高分布很复杂, 用一个连续函数拟合则参数非常多, 因此采用分段函数拟合, 拟合函数形式为

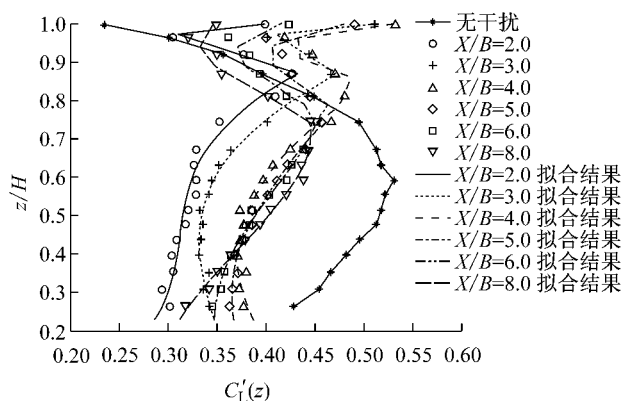
$$C_L'(z) = p_1 \left(\frac{z}{H} \right)^3 + p_2 \left(\frac{z}{H} \right)^2 + p_3 \left(\frac{z}{H} \right) + p_4 \quad (4)$$

式中, p_4 为拟合的系数参数. 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.

式中各间距比下分段区间以及参数取值见表 2, 拟合的结果见图 7b.



a 平均层风力系数



b 脉动层风力系数

图 7 串列工况下横风向层风力系数

Fig. 7 Across-wind layer force coefficients(tandem)

表 2 串列工况下脉动层风力系数函数拟合参数取值

Tab. 2 Parameter value of RMS layer force coefficients function fitting(tandem)

X/B	高度区间	p_1	p_2	p_3	p_4
2.0	$Z < 0.87H$	1.34	-1.80	0.86	0.17
	$Z \geq 0.87H$	496.07	-1 369.88	1 258.51	-384.27
3.0	$Z < 0.87H$	0.58	-0.25	-0.11	0.38
	$Z \geq 0.87H$	454.30	-1 253.27	1 150.73	-351.21
4.0	$Z < 0.81H$	-0.01	0.67	-0.51	0.47
	$Z \geq 0.81H$	147.69	-392.99	347.44	-101.59
5.0	$Z < 0.74H$	-0.43	1.05	-0.51	0.43
	$Z \geq 0.74H$	43.48	-110.33	92.66	-25.32
6.0	$Z < 0.74H$	-0.90	1.53	-0.58	0.41
	$Z \geq 0.74H$	27.79	-69.75	57.69	-15.30
8.0	$Z < 0.74H$	-1.34	1.66	-0.31	0.31
	$Z \geq 0.74H$	13.26	-32.37	25.59	-6.14

从图 8 可以看出, 间距比小于 4.0 时, 各层干扰因子随间距比增大而增大, 在 $0.7H$ 高度以下, 干扰因子变化幅度不大; 间距比为 2.0 时, $0.7H$ 以下各层干扰因子在 0.64 左右; 间距比为 3.0 时, $0.7H$ 以下各层干扰因子在 0.69 左右; 间距比 4.0 时, $0.7H$

以下各层干扰因子在 0.79 左右,在 $0.7H$ 高度以上,干扰因子随高度增大而大幅增大,顶层干扰因子最大,达到 2.26;间距比大于 4.0 时,在 $0.7H$ 高度以下,各层干扰因子随间距比变化不大,并且沿高度变化的幅度也很小,各层干扰因子均在 0.8 左右,在 $0.7H$ 高度以上,各层干扰因子随间距比增大而减小,且各层干扰因子随高度增加而增大。

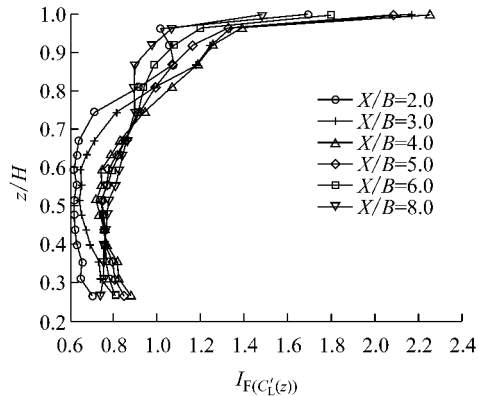


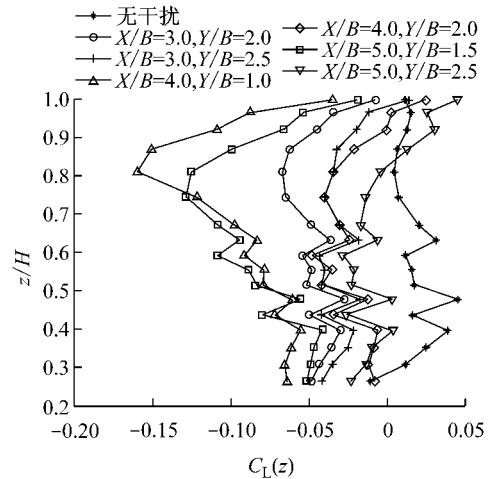
图8 串列工况横风向脉动层风力系数干扰因子
Fig.8 IF of RMS coefficients of across-wind layer force(tandem)

2.3 典型斜列工况下的干扰效应

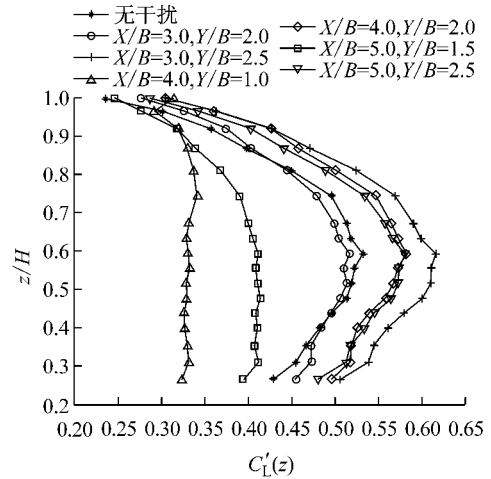
从图 9a 可以看出,横向间距比小于 1.5 时,干扰效应使各层横风向平均层风力增大,下部增大较少,上部增大较多;横向间距比大于 2.0 时,各层横风向平均层风力都在零附近,平均层风力的干扰效应不明显。

由图 9b 可知,当横向间距比小于 1.5 时, $C_L'(z)$ 沿高度的分布规律与单体工况不同,施扰建筑位置在 (4.0, 1.0) 时,各层 $C_L'(z)$ 沿高度变化幅度不大,均值 0.33 左右。施扰建筑位置在 (5.0, 1.5) 时,在 $0.7H$ 高度以下各层 $C_L'(z)$ 均在 0.41 左右,在 $0.7H$ 高度以上则逐渐减小,顶层最小,为 0.25 左右。当横向间距比大于 2.0 时, $C_L'(z)$ 沿高度的分布规律与单体工况相同,沿高度先增大后减小,在 $0.6H$ 高度处取得最大值。具体各个位置各层 $I_{F(C_L'(z))}$ 见图 10。

从图 10 可以看出,当横向间距比小于 1.5 时,干扰因子沿高度先减小后增大,在 $0.6H$ 处取得最小值,为 0.62 左右,在顶部取得最大值,为 1.32 左右(位置坐标为 (4.0, 1.0))。随着横向间距比增大,干扰因子沿高变化逐渐平缓,当横向间距比等于 2.0 时, $X/B=4.0$ 的各层干扰因子比 $X/B=3.0$ 的各层干扰因子大,干扰因子沿高变化也更平缓,这是因为此时受扰建筑位于施扰建筑尾流区,纵向间距比为



a 平均层风力系数



b 脉动层风力系数

图9 斜列工况下横风向层风力系数

Fig.9 Across-wind layer force coefficients(oblique)

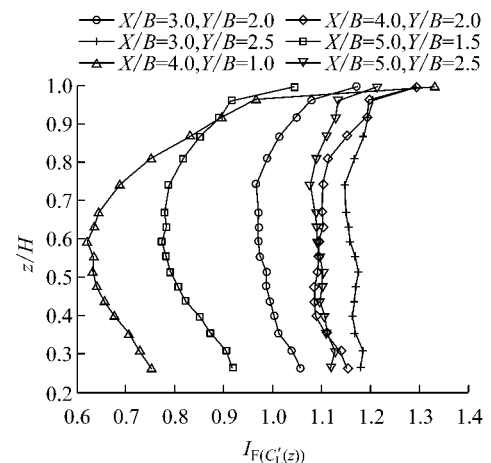


图10 斜列工况横风向脉动层风力系数干扰因子
Fig.10 IF of RMS coefficients of across-wind layer force(oblique)

4.0 时,受扰建筑更接近尾流边缘,干扰效应较严重。当横向间距比等于 2.5 时, $X/B=3.0$ 的各层干扰因

子比 $X/B=5.0$ 的各层干扰因子大,这是因为施扰建筑位于 $(3.0, 2.5)$ 时,受扰建筑恰好位于施扰建筑的尾流边缘,干扰效应最严重;在沿高分布上,干扰因子在 $0.8H$ 高度以下基本相近,在 $0.8H$ 高度以上干扰因子随层高增加而逐渐增大。

图 10 还表明,横向间距比小于 1.5 时,各个位置除了顶部干扰因子大于 1.0,其余各层 $I_{F(C'_L(z))}$ 均小于 1.0;横向间距比不小于 2.0 时,除了位于 $(3.0, 2.0)$ 处的受扰建筑在 $0.5H \sim 0.8H$ 高度内各层 $I_{F(C'_L(z))}$ 略小于 1.0,其余位置各层的 $I_{F(C'_L(z))}$ 均大于 1.0,最大为 1.3 左右(位置坐标 $(3.0, 2.5)$),因为施扰建筑位于 $(3.0, 2.5)$ 时,受扰建筑恰好位于施扰建筑的尾流边缘,所以各层干扰因子最大。

3 结论

对施扰建筑位于不同位置时受扰建筑的横风向层风力干扰特性进行了研究,分并列、串列和斜列工况进行了详细分析,可以得到如下结论:

(1) 在无干扰时,单体建筑的横风向平均层风力基本为零,当存在并列的施扰建筑时,受扰建筑受到指向施扰建筑的吸力,并列间距比越小吸力越大;当存在串列建筑物时,横风向平均层风力仍然基本为零;当存在斜列建筑物时,若横向间距比较小,受扰建筑的横风向平均层风力会增大,但横向间距较大时,横风向平均层风力的干扰效应很小。

(2) 对并列、串列工况给出了横风向脉动层风力系数沿高分布的拟合公式。并列布置时,干扰因子随间距比增大而增大,当间距比超过 4.0 时,各层干扰因子均大于 1.0;串列布置时, $0.8H$ 高度以下各层的干扰因子值在 0.8 左右,顶部的干扰因子很大,间距比等于 4.0 时的干扰效应最严重,顶部干扰因子最大达到 2.26。

(3) 斜列布置时横向间距比对横风向脉动层风力干扰因子沿高分布规律起主导作用,一般地,横向间距比越小,干扰因子越小。横向间距比小于 1.5 时,除了顶层外各层干扰因子均小于 1.0;横向间距比大于 2.0 时,当建筑物处于施扰建筑尾流边迹时,干扰因子都比较大且大于 1.0, $(3.0, 2.5)$ 处的干扰效应最严重,顶层干扰因子达到 1.30,其余各层干扰因子均在 1.17 左右。

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. 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.
- [3] 谢壮宁, 顾明, 倪振华. 3个不同高度高层建筑间的横风向动力干扰效应[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(9): 967.
XIE Zhuangning, GU Ming, NI Zhenhua. Crosswind dynamic interference effects among three tall buildings with different heights[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(9): 967.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Xie Z N, Gu M. Mean interference effects among tall buildings[J]. Engineering Structures, 2004, 26(9): 1173.
- [8] 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.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50009—2012 Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [10] Architectural Insititute of Japan. AIJ2004 Recommendation for coads on buildings[S]. Tokyo: Architectural Insititute of Japan, 2004.