

文章编号: 1000-4750(2005)05-0136-06

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

*谢壮宁¹, 顾 明², 倪振华¹

(1. 汕头大学土木工程系, 汕头 515063; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 分析了 5 种不同高度比的两个任意排列的施扰建筑物对受扰建筑的顺风向动力干扰影响, 结果显示两个施扰建筑的协同作用会产生远高于单个施扰建筑的干扰效应。采用人工神经网络、统计方法对不同参数配置的包络干扰因子(EIF)分布进行分析, 发现不同高度比配置以及不同地貌类型下的 EIF 分布存在较为明显的相关特征, 并由此得到了可以反映不同参数对 EIF 分布影响的定量关系, 它大大地简化了考虑多参数变化干扰效应研究结果的繁杂程度, 使结构受扰后的荷载估计计算更趋于简洁合理。根据对于试验数据的归纳分析结果, 初步提出了一些可供规范修改时参考的建议。

关键词: 高层建筑; 风荷载; 风洞试验; 顺风向响应; 干扰因子; 相关分析

中图分类号: V211.74 文献标识码: A

EXPERIMENTAL STUDY OF ALONG-WIND DYNAMIC INTERFERENCE EFFECTS AMONG THREE ARBITRARILY ARRANGED TALL BUILDINGS

*XIE Zhuang-ning¹, GU Ming², NI Zhen-hua¹

(1. Department of Civil Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China;

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

Abstract: Wind-induced along-wind dynamic interference effects of tall buildings are studied by a series of wind tunnel tests. Interference excitations of upwind buildings with various heights in different upwind terrains are considered. Interference characteristics are investigated by artificial neural network (ANN) method and correlation analysis. The results show that two upstream buildings cause more adverse dynamic effects on the downstream building than a single upstream building does. Significant correlations are found in the distributions of the envelope interference factors of different configurations and upwind terrains, a series of relevant regression equations are therefore proposed to simplify the complexity of the multi-parameter wind-induced interference effects among three tall buildings. Recommendations about the along-wind dynamic interference effects on three tall buildings are also given as the reference for improving the design code of wind loads.

Key words: tall building; wind load; wind tunnel test; along-wind response; interference factor; correlation analysis

收稿日期: 2003-09-21; 修改日期: 2003-11-28

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(59895410); 国家自然科学基金项目(50478118); 教育部博士点基金和广东省自然科学基金(010455)联合资助

作者简介: *谢壮宁(1963), 男, 广东汕头人, 教授, 工学博士, 主要从事结构抗风研究(E-mail: znxie@stu.edu.cn);

顾 明(1957), 男, 江苏兴化人, 教授, 博士生导师, 长江学者, 主要从事结构抗风研究;

倪振华(1945), 男, 浙江上虞人, 教授, 主要从事结构抗风研究。

实际环境中作用于高层建筑物上的风荷载与其孤立状态所测定的结果并不相同,位于不同相对位置、形状和高度的临近建筑物会对建筑上作用的风荷载产生不同程度的干扰影响,已有研究^{[1][2][3][4]}以及相关的研究综述^[5]指出这种干扰影响有时会远远超出了可忽略的范围,必须得到正确的评估。在近二、三十年中,群体建筑的风干扰效应一直是风工程领域的研究热点之一,但由于影响因素众多导致问题的高度复杂性,绝大多数的研究均局限在考虑两个建筑物间干扰效应的研究上,这体现在近期国际上的相关刊物在本领域的报道依然是考虑两个建筑物间的干扰效应^[6]。

然而已有的少数研究报道^[7]和本文作者的前期的试验研究结果^[8]均显示,在某种排列下两个施扰建筑物的干扰影响会明显高于单个建筑物的干扰影响。作为阶段性的研究总结和问题本身的复杂性,文献[8]从定性的角度讨论了不同宽度比的三个建筑物间的动力干扰效应。本文则旨在进一步采用定量的分析方法寻找不同参数对三个高层建筑物间顺风向动力干扰效应影响的潜在规律,同时研究不同高度施扰建筑对动力干扰效应的影响。

1 基本公式和相关试验简介

1.1 基本公式

根据高频底座力天平(HFBFB)理论^[9],假定结构基阶振型沿高度线性分布。则由模型风洞试验得到的基底弯矩功率谱密度可以估算高层建筑结构基底弯矩响应的均方值

$$\sigma_M = \sigma_{M'} \sqrt{1 + \frac{\pi}{4} \frac{1}{\zeta} \frac{\chi_0 S_{M'}(\chi_0)}{\sigma_{M'}^2}} \quad (1)$$

式中 $S_{M'}$ 和 $\sigma_{M'}$ 分别为基底弯矩功率谱密度函数和基底弯矩均方值, ζ 为结构的模态阻尼比,而 $\chi_0 = f_s D / V_H$ 为结构的无因次顺风向基阶模态频率, V_H 、 f_s 和 D 分别为受扰建筑的结构顶部风速、基阶固有频率和迎风宽度。很显然,结构的基底弯矩响应很大程度上取决于基底弯矩功率谱密度在 χ_0 处的值,而 χ_0 的倒数就是折算风速,即 $V_r = V_H / f_s D$ 。采用无因次化的折算处理便于在模型和原型间转换,同时采用 HFBFB 方法在测得结构的基底弯矩功率谱密度后,实施一次吹风试验由以上关系便可很容易得到不同结构顶部风速(也即不同折算风速)的结构动力响应,这是 HFBFB 技术的主要优点之一。

已有文献研究中^[7],采用以下干扰因子(IF)来衡量顺风向动力干扰效应:

$$IF = \frac{\text{有干扰时的 } \sigma_M}{\text{孤立建筑时的 } \sigma_M} \quad (2)$$

由上式可很容易由结构在单体时的基底弯矩响应均方值快速推算存在干扰物体时的动力响应,且模型和原型的 IF 值是相同的。显然 IF 值和 V_r 有关,文献[8]的实际测量分析结果也是如此。一般情况下,IF 随 V_r 的变化不是一个简单的递增或递减过程,但在临界折算风速附近,上游结构的漩涡脱落频率和结构的固有频率一致而发生涡激共振响应,此时的 IF 值一般会比较高^[8]。

为了简化结果,取以上干扰因子在可能折算风速范围内的最大值,也即包络干扰因子(Envelope interference factor, EIF)值来统一简化衡量结构间的动力干扰响应:

$$EIF = \max_{V_r \in [2,9]} IF(V_r) \quad (3)$$

以上计算中,根据实际的高层建筑结构的一般折算风速罕有达到 10 的情况和略偏于保守的原则,计算时 V_r 的取值范围取为^[2,9]。

1.2 试验简介

本文试验的主要设备是风洞,试验在汕头大学风洞实验室的 STDX-1 风洞进行。首先根据国家规范^[10],在此风洞中分别模拟了 B 类和 D 类地貌流场^[8]。主要的测试设备则采用 Nitta 的六分量天平和相应的信号调制放大系统,本身各分量的固有频率都很高,装上本文试验所用轻质模型后其最低频率可在 112Hz 以上,可以满足相关的试验要求。

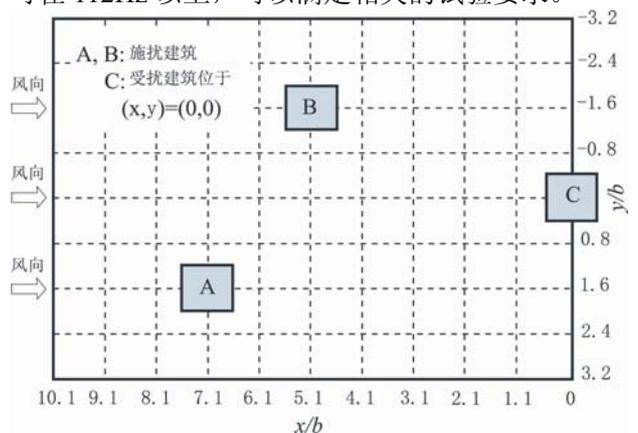


图1 施扰建筑模型移动网格图

Fig.1 X-Y coordinate grid for locating the interfering buildings

试验测试用的模型为一尺度为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 600\text{mm}$ 的方柱(简称受扰建筑)模拟一缩尺

比为 1:400 的高层建筑, 动力响应分析中假定原型的 $f_s=0.2\text{Hz}$, $\zeta=0.02$ 。试验共考虑了 5 种施扰建筑高度(0.5h、0.75h、1.0h、1.25h、1.5h)的两个建筑物(简称为施扰建筑)对受扰建筑的影响, $h=600\text{mm}$ 为受扰建筑模型的高度。

试验时在 B、D 两类地貌下考察了不同高度的两个施扰建筑在不同相对位置对受扰建筑的影响, 其移动的坐标系见图 1。图中 A、B 为施扰建筑, C 为被固定于坐标原点的受扰建筑。根据试验得出的依然是有限点上的 EIF 数据, 通过应用人工神经网络(ANN)方法由试验结果进行训练可以得到整个区域上 EIF 的分布模型, 再进一步分析或绘图输出各种 EIF 的等值分布曲线。

2 结果分析

2.1 基本配置的结果

基本配置是指施扰建筑和受扰建筑大小一致也就是高度比 $H_r=1$ 的情况。为了和两个建筑物间的干扰效应进行比较, 首先分析两个大小相同的建筑物间在 B 类地貌下的顺风向动力干扰效应, 结果见图 2。由图中可见, 最大 EIF 值高达 2.4, 多数区域则在 1.8 以上。

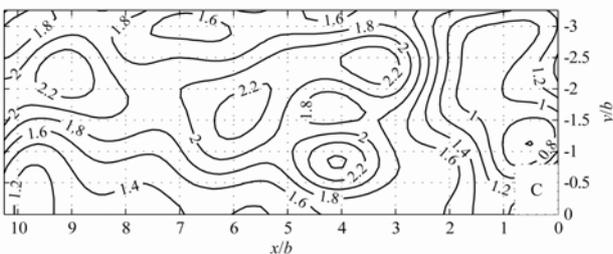


图 2 基本双建筑物配置顺风向 EIF 分布(B 类地貌)

Fig.2 Contours of the EIFs of two identical building configurations (in exposure category B)

三建筑物配置的 EIF 值要显著高于双建筑物配置, 将一个施扰建筑固定在(3.1b,-2.4b)上, 考察位于不同施扰位置的另外一个施扰建筑对 EIF 分布的影响, 结果见图 3。由图中可见, 最大 EIF 值由双建筑配置的 2.43 升至 6.5, 两者相差高达 167%, 这种差别要远高于文献[8]所分析的折算风速为 8 的情况。并且由图中可见, 在相当大的移动区域内包络干扰因子都相当显著, 取值大部分超过 3.5。

同时考虑两个施扰建筑物的影响时, 在同一种配置下的干扰变化因素有 4 个(即反映两个施扰建筑物相对位置的 4 个坐标值), 直接采用图形方法表示它们对干扰因子的影响比较困难。根据试验得到

的包络干扰因子采用 ANN 方法进行建模后作细化分析, 根据不同施扰位置配置情况所对应 EIF 的最大值, 按照可分原则分若干个区域来表示当施扰建筑落入这些区域时的包络干扰因子的大致取值范围, 结果见图 4。

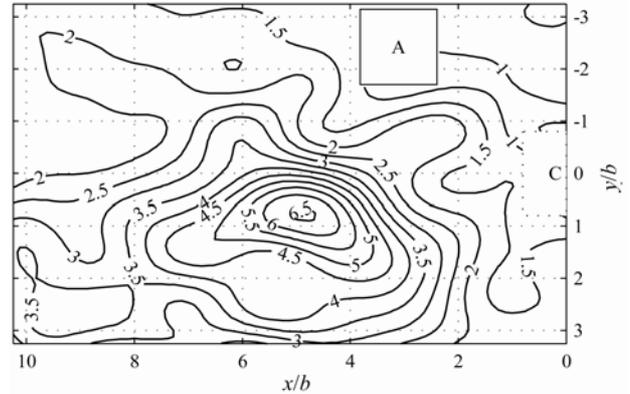


图 3 固定 A 于(3.1b,-2.4b)时的 EIF 分布(B 类地貌)

Fig.3 Contours of the EIFs of three identical buildings while model A is fixed at (3.1b,-2.4b) (in exposure category B)

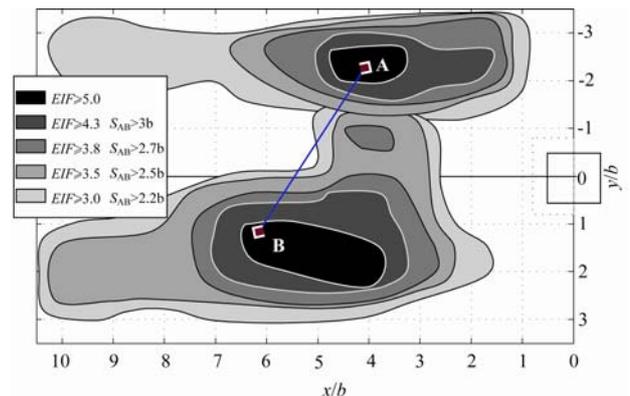


图 4 基本三建筑物配置的包络干扰因子分布(B 类地貌)

Fig.4 Envelope interference factor contours of three identical building configurations (in exposure category B)

图中的 S_{AB} 为两个施扰建筑物间的距离, 当两个施扰建筑位于图中上下两个不同区域且间距满足图标中的条件时, 相应 EIF 值就会超过图标中的相应值。例如当 A、B 两个施扰建筑位于中白线所界定的最深色区域的 EIF 会超过 5.0。注意到 EIF 分布的对称性, 故以上区域也存在关于 x 轴($y=0$) 的对称区域。采用这种方式可以比较简洁有效地表示两个施扰建筑物的干扰影响。

这里应当指出的是, 本文仅仅是针对 σ_M 即顺风向基底弯矩响应的均方值进行分析, 它只是反映了脉动风所引起的动力响应部分。实际上结构的整体荷载还应该包含基底弯矩 M 的平均部分, 通常用 $M = \bar{M} + g\sigma_M$ 来估算总的高层建筑结构顺风向基

底弯矩响应。式中 \bar{M} 为平均基底弯矩值， g 为峰值因子。对于 \bar{M} ，上游建筑的存在通常是起到一种遮挡作用而使其变小，因而总的干扰效应不会有只考虑 σ_M 的大。但本文所观测到的由于干扰(尤其是当两个施扰建筑联合作用)所引起的 σ_M 的显著增大，也的确应该引起注意。

2.2 施扰建筑高度的影响

在施扰建筑和受扰建筑等宽度的情况下，分析 $H_r=0.5$ 、0.75、1.0、1.25、1.5 五种不同的高度比的两个施扰建筑对受扰建筑的影响。

(1) 统计分析

首先采用统计方法对不同高度比配置的 EIF 分布特性进行分析，结果见图5。图中分布函数 p 表示包围干扰因子为 EIF 所对应的施扰位置总数占全部施扰位置总数的百分比。

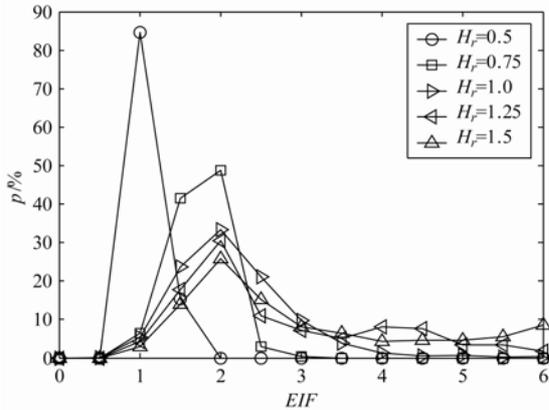


图5 不同 H_r 施扰建筑的 EIF 分布(B类)

Fig.5 Distributions of the EIF s of three building configurations with different height ratios (in exposure category B)

由图中可见，对于 $H_r=0.5$ 的施扰建筑的动力干扰效果不很明显，在B类地貌下，约占85%施扰位置的 EIF 值在1左右，剩余的15%的 EIF 在1.5左右。 $H_r=0.75$ 的施扰建筑的干扰影响要大一些，多数施扰位置的 EIF 在1.5至2左右。随着施扰建筑高度的增加，顺风向动力干扰效应显著增强。

(2) 相关分析

以上采用定性的方式分析比较了不同高度施扰建筑对受扰结构的动力干扰影响，以下进一步采用相关分析方法对不同高度比配置下的 EIF 分布进行比较以寻求它们之间蕴含的相互关系。

首先分析 $H_r=1.25$ 和 $H_r=1.0$ 两种配置的 EIF 分布的相互关系，结果见图6。图中的横坐标表示基本配置的 EIF 值，纵坐标为 $H_r=1.25$ 配置的 EIF

值， RIF 表示两种配置 EIF 分布的线性回归结果。由图中可见，两种配置 EIF 分布存在显著的线性相关性，计算中得到反映两组数据相关程度的相关系数 $\rho=0.89$ ，而线性回归结果的残差 $\varepsilon=0.5$ 。

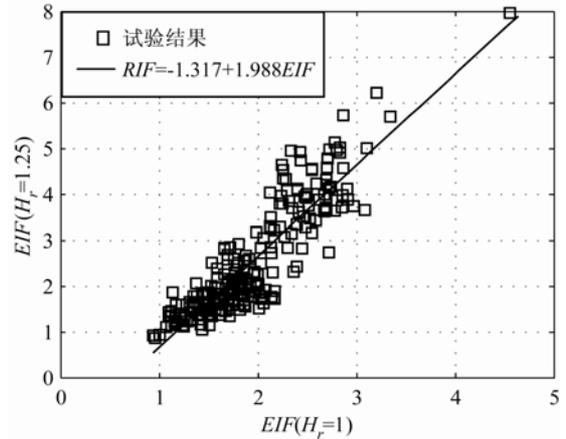


图6 $H_r=1.25$ 和 $H_r=1.0$ 配置的 EIF 分布的相关分析

Fig.6 Correlation analysis of the EIF s for the configurations of different height ratios

其它配置和基本配置的 EIF 仍存在明显的相关性，根据回归分析可得非基本配置和基本配置之间可以用以下关系表示：

$$RIF = \begin{cases} 1.011 + 0.031EIF & H_r = 0.5 \\ 0.698 + 0.408EIF & H_r = 0.75 \\ EIF & H_r = 1 \\ -1.317 + 1.988EIF & H_r = 1.25 \\ -1.524 + 2.256EIF & H_r = 1.5 \end{cases} \quad (4)$$

式中 EIF 表示基本配置的包围干扰因子， RIF 表示相应不同高度比配置的干扰因子和基本配置的回归结果，对于其它高度比情况，可由(4)并采用插值方式得到。将(4)式中的不同高度比配置的回归关系进行比较，结果见图7。

由图和式(4)可见，两个施扰建筑的动力干扰效应随着其高度的增加而增强。相对于基本配置情况，高度只有受扰建筑高度一半的施扰建筑的影响可以忽略不计，影响变化最为剧烈的高度比在0.75到1.25之间，从 $H_r=1.25$ 到1.5的干扰因子变化则较为平缓。这个结果和定性分析的结论是一致的。

由以上分析，对于不同 H_r 的施扰建筑，其 EIF 值可以由基本配置的结果由式(4)直接推测。如考虑 $H_r=1.5$ 的两个施扰建筑位于 $(4.1b, \pm 1.6b)$ 的顺风向动力干扰效应，由图4可见对应于基本配置($H_r=1.0$)的相应 EIF 结果为4.3以上(实测结果为4.5)，根据以上的回归结果可以推测当 $H_r=1.5$ 的 EIF 值为8.17，而实测的 $EIF=7.8$ ，结果较为满意。

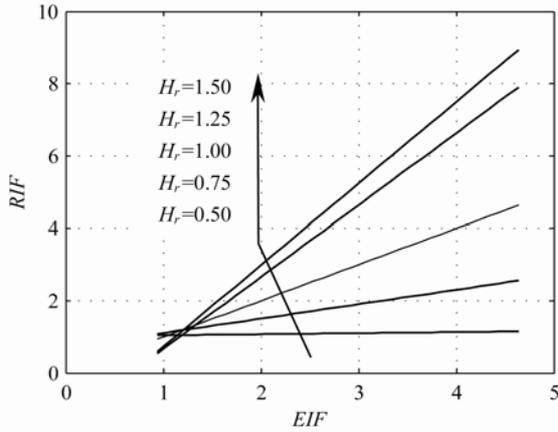


图 7 不同高度比配置 EIF 回归关系的比较

Fig.7 Comparison of the regression results of the EIF for the configurations of different height ratios.

2.3 地貌的影响

图 8 为在 D 类地貌下不同施扰建筑高度的干扰因子分布情况的比较。显然，高度比对 EIF 的影响具有和 B 类地貌下相一致的特征，同时和图 5 比较可以看出：随着地貌的粗糙化，EIF 值显著降低。

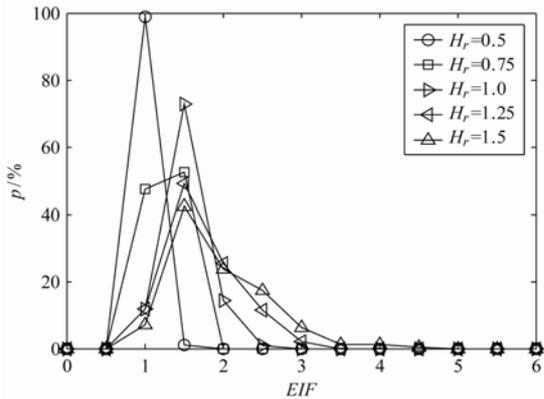


图 8 不同 Hr 施扰建筑的 EIF 分布(D 类)

Fig.8 Distributions of the EIFs of three building configurations with different height ratios (in exposure category D)

同样采用相关分析方法分析同一配置在 B、D 两类地貌下的 EIF 分布的相互关系。图 9 为基本配置在两种地貌下 EIF 分布的相关分析比较，图中 EIF_B 和 EIF_D 分别表示在 B、D 两类地貌下的包络干扰因子，RIF 同样表示回归结果。由图中可见，两组数据存在明显的相关性。分析中除了 Hr=0.5 配置由于其本身的干扰影响不太明显而使数据存在较大的相对离散性之外，其它高度比配置在 B、D 两类地貌的 EIF 数据同样存在较强的相关性。

两类地貌的结果可由以下简单的线性关系描述：

$$EIF_D = \begin{cases} 0.946 + 0.093EIF_B & H_r = 0.5 \\ 0.819 + 0.181EIF_B & H_r = 0.75 \\ 0.599 + 0.332EIF_B & H_r = 1 \\ 0.806 + 0.273EIF_B & H_r = 1.25 \\ 0.757 + 0.314EIF_B & H_r = 1.5 \end{cases} \quad (5)$$

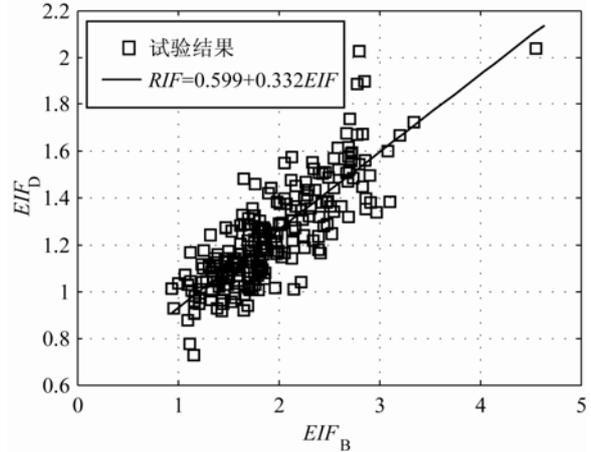


图 9 基本配置在不同地貌下 EIF 分布的相关分析

Fig.9 Correlations of the EIFs of three identical buildings in different upwind terrains

图 10 为以上 5 种不同高度比 EIF 值在两种地貌下回归关系的比较。由图可见，几种配置的回归关系大致相当，这意味着流场特性对不同高度比的施扰建筑物的顺风向动力干扰影响大致相当。

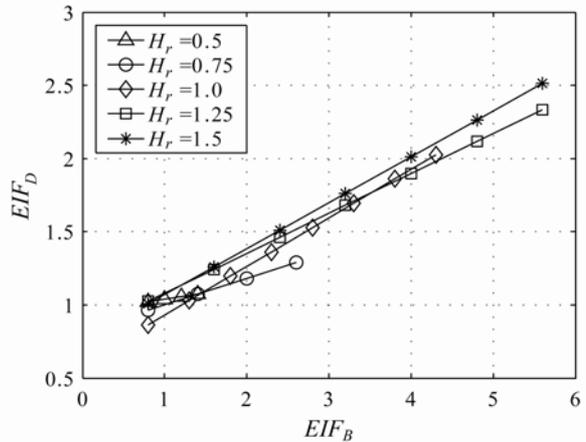


图 10 不同高度比 EIF 分布在不同地貌下的回归结果

Fig.10 Regression results of the EIFs in different upwind terrains for configuration of different height ratios

考虑到回归的数据仍存在一定的离散性，从偏于保守的角度出发，建议取 Hr=1.5 的结果作为两种地貌干扰因子的转换关系，即：

$$EIF_D = 0.757 + 0.314EIF_B \quad (6)$$

上式和图 10 同时也反映出，随着地貌的粗糙化，动力干扰效应显著降低的这样一个普遍事实。根据以上分析，应用中可以由 3.1 和 3.2 所介绍的 B

类地貌的相关结果, 直接由式(5)或(6)推测 D 类地貌下的相应干扰因子。

3 结论

本文对任意排列的三个建筑物间的顺风向包络动力干扰效应进行了较为细致的研究, 分析了不同高度比的施扰建筑高度和地貌类型对动力干扰效应的影响。针对包络干扰因子分布提出一些有效的表示方法, 解决了三建筑物配置干扰因子难以表示的难点。由以上分析可得出以下结论:

(1) 两个施扰建筑的协同作用会产生远高于单个施扰建筑的干扰效应, 结果分析对比显示两个大小和受扰建筑一致的施扰建筑可能产生的最大 *EIF* 会比单个施扰建筑高出 167%, 可达 6.5。*EIF* 值随施扰建筑的高度的增加而增强, 但随地貌的粗糙化显著降低, 可以忽略高度只有受扰建筑一半的施扰建筑的干扰作用。

(2) 采用相关分析发现不同高度比配置以及不同配置在 B、D 两类地貌下的 *EIF* 分布均存在明显的相关性, 由回归分析得到一系列反映不同参数对 *EIF* 分布影响的定量关系, 它大大地简化了考虑多参数变化干扰效应研究结果的繁杂程度, 使结构受扰后的荷载估计计算更趋于简洁合理, 便于数据的表达、应用和推广。

(3) 应用中为了评估不同高度的三个建筑物间的顺风向动力干扰效应, 可首先参考图 4 所示 B 类地貌下的基本三建筑配置的显著干扰因子分布结果取值, 对于不同高度的施扰建筑则可用式(4)进行修正, D 类地貌情况则可以用式(5)或(6)进行修正。

参考文献:

- [1] Bailey P A, Kwok K C S. Interference Excitation of Twin Tall Buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1985, 21: 323~338.
- [2] Kareem A. The effects of aerodynamic interference on the dynamic response of prismatic structures [J]. Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, 1987, 25: 365~372.
- [3] Taniike Y, Inoka H. Aeroelastic behaviour of a tall building in wakes [J]. Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, 1988, 28: 317~327.
- [4] Taniike Y. Interference mechanism for enhanced wind forces on neighbouring tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, 1992, 41: 1073~1083.
- [5] Khanduri A C, Stathopoulos T, Bédard C. Wind-induced interference effects on buildings – a review of the state-of-the-art [J]. Engineering Structures, 1998, 20(7): 617~630.
- [6] Thepmongkorn A, Wood G S, Kwok K C S. Interference effects on wind-induced coupled motion of a tall building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90: 1807~1815.
- [7] Saunders J W, Melbourne W H. Buffeting effects of upstream buildings [C]. Proceedings of the 5th International Conference on Wind Engineering, Fort Collins CO, Pergamon Press, Oxford, 1979. 593~605.
- [8] 谢壮宁, 顾明, 倪振华. 不同断面宽度群体高层建筑的干扰效应, 第 1 部分: 顺风向响应[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(4): 8~16.
Xie Zhuangning, Gu Ming, Ni Zhenhua. Wind-induced dynamic interference effects on different sized tall buildings (Part I: Along-wind Response)[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(4): 8~16. (in Chinese)
- [9] Tschanz T, Davenport A G. The base balance technique for the determination of dynamic wind loads [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 13: 429~439.
- [10] GB50009—2001, 建筑结构荷载规范[S].
GB50009—2001, Chinese load design code for building structures [S]. (in Chinese)
- [1] Bailey P A, Kwok K C S. Interference Excitation of Twin Tall Buildings [J]. Journal of Wind Engineering and