

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201604087

矩形高层建筑顺风向脉动风荷载空间相关性

曾加东¹,李明水^{1,2},李少鹏¹

(1.西南交通大学 风工程试验研究中心,成都 610031;2.风工程四川省重点实验室(西南交通大学),成都 610031)

摘要:为研究风场类别、结构特征尺寸及竖向间距等因素对矩形高层建筑顺风向脉动风荷载空间相关性的影响,采用矩形刚性模型表面压力同步测量试验,对顺风向脉动风荷载及脉动风速相干函数空间分布特性进行研究,对矩形模型表面脉动风荷载与脉动风速、迎风面与背风面脉动风压的相关性进行对比分析.根据试验结果,对传统脉动风速相干函数模型进行改进,提出了可计及风场类别、结构迎风面宽度及竖向间距等流场和结构参数的矩形建筑顺风向脉动风荷载相干函数表达式.结果表明:顺风向脉动风荷载的相关性要明显强于脉动风,当矩形断面长边迎风时,迎风面脉动风压相关性低于断面整体风荷载的相关性,背风面脉动风压的弱相关性在间距较小时并不能完全忽略,采用传统脉动风速相干函数模型可能导致脉动风荷载取值偏不安全.

关键词:矩形高层建筑;顺风向脉动风荷载;竖向相关性;相干函数;风洞试验

中图分类号: TU973.213

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)06-0150-06

Spatial correlation analysis of fluctuating along-wind loads on high-rise buildings with rectangular section

ZENG Jiadong¹, LI Mingshui^{1, 2}, LI Shaopeng¹

(1.Research Center for Wind Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2.Wind Engineering Key Laboratory of Sichuan Province (Southwest Jiaotong University), Chengdu 610031, China)

Abstract: To investigate the influence of turbulence characteristic, structure dimension and separation distance on spanwise correlation characteristics of fluctuating along-wind loads acting on the rectangular building, the surface pressure fluctuations on a rigid model with rectangular cross-section were measured synchronically in the simulated atmospheric boundary layers. The distribution characteristics of coherence function of fluctuating along wind loads and oncoming turbulence were also studied. The correlation of unsteady along-wind loads and wind fluctuations, and the fluctuating pressures acting on windward side and leeward side were compared through present experiments. A modified expression of a coherence function of fluctuating along-wind loads on rectangular high-rise building was proposed by considering various parameters, including windward width of structure, spatial spacing and incoming wind characteristics. The measured results show that the fluctuating along-wind loads are more correlated than the wind fluctuation. The correlation of fluctuating pressures on windward side is weaker than that of overall unsteady drag forces in the case of model whose width exceeds the stream wise dimension. The weak correlation of fluctuating wind pressure on leeward side can't be ignored at a small separation distance. So the conventional coherence model of turbulence is unsafe for predicting the fluctuating along-wind loads of the high-rise buildings.

Keywords: rectangular high-rise buildings; along-wind fluctuating wind load; vertical correlation; coherence function; wind tunnel test

在高层建筑顺风向等效静力风荷载及风振响应计算时,为描述脉动风荷载空间分布特性,需要明确脉动风荷载空间相关性和气动导纳^[1].就脉动风荷载相关性而言,国内外相关规范沿用了Davenport^[2]提出的“脉动风压与脉动风速具有一致的空间相关性”这一假定.已有研究表明^[3-4]:脉动风压的相关性要显著高于脉动风.气动导纳函数

对脉动风荷载具有空间相关性折减作用^[1],对于采用测压方法直接获得建筑结构表面脉动风压的研究,可不用考虑.

Davenport^[2,5]最早提出脉动风速相干函数可采用频率及两点间距的简单指数函数表示.ESDU^[4]及Krenk^[6]指出该模型的衰减因子存在较大不确定性,但由于缺乏高层建筑脉动风荷载空间相关性数据,该不确定性已成为结构响应计算不可忽略的误差之一.中国现行《建筑结构荷载规范》^[7]采用了Shiotani^[8]提出的与两点间距有关的相干函数模型,这对简化计算有利,但该函数与频率无关,在整个结

收稿日期: 2016-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(51278433, 51478402)

作者简介: 曾加东(1987—),男,博士研究生;

李明水(1966—),男,教授,博士生导师

通信作者: 李明水, lms_rcwe@126.com

构频率区段内取为常数可能导致计算误差.顾明等^[9]针对不同截面形式的高层建筑进行了大量研究,给出一种便于工程应用的脉动风荷载相干函数经验公式.黄冬梅等^[10]通过某一特殊外形超高层建筑测压试验,分析了超高层建筑脉动风荷载的空间相关性,并得到了相应的相干函数表达式.

在以上研究中,一般未考虑紊流风场空间结构与脉动风荷载相关性之间的关系.研究表明,当紊流积分尺度大于或者接近结构尺寸时,脉动风压相关性会得到增强^[11].此外,在钝体(流线型箱梁主梁断面、矩形断面)相干函数研究中,认为紊流度对脉动风荷载空间相关性影响较小^[12-13],如文献[11,14-15]提出的相干函数模型中,均主要考虑紊流积分尺度影响,该结论在高层建筑中是否一致仍需讨论.

为进一步探讨高层建筑顺风向脉动风荷载及脉动风速的空间相关性,减小因相干函数不确定性导致的误差,本文在三类大尺度紊流风场中,通过刚性模型同步测压试验,对矩形模型顺风向脉动风荷载空间结构进行研究.以典型钝体结构——矩形断面作为研究对象,考虑到矩形高层建筑宽厚比较少有超过 3 的情况,试验选取模型宽厚比为 2 : 1.根据试验结果,对脉动风速、顺风向脉动风荷载、迎风面和背风面脉动风压的空间相关性进行对比分析.实验结果验证了高层建筑脉动风荷载相关性强于脉动风速这一结论.在传统相干函数模型基础上,综合考虑紊流风场、间距及结构特征尺寸对脉动风荷载相干函数的影响,提出可计及流场参数,竖向间距和结构特征尺寸的矩形建筑顺风向脉动风荷载相干函数经验公式,可为矩形高层建筑顺风向脉动风荷载精细化分析提供参考.

1 试验概况

1.1 测压试验简介

本试验在西南交通大学 XNJD-3 工业风洞进行.试验段截面为 22.5 m(宽)×4.5 m(高),风速范围为 1.0 ~ 16.5 m/s.模型高 2.3 m,矩形截面长 20 cm,宽 10 cm,见图 1.为增加高度方向(竖向)测点层组合个数,该模型高宽比较大,考虑到本文主要从基础研究的角度出发,分析矩形高层建筑脉动风荷载空间相关性,模型高宽比可适当放宽.在高度方向上共布置 11 层测点,离地高度分别为 19、24、44、67、90、110、125、130、133、151、181 cm.每层测点均为 52 个,测点布置见图 2.试验采用电子扫描阀(型号 DSM-3400)测量风向角为 0°和 90°时模型的表面风压,并定义来流垂直长边时风向角为 0°(图 2).

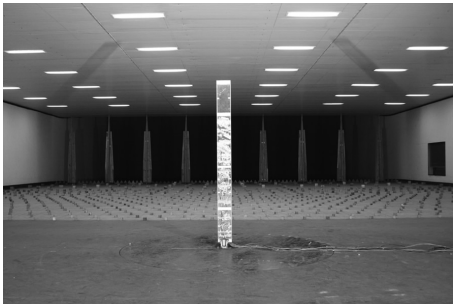


图 1 刚性模型测压试验

Fig.1 The rigid model for pressure measurements

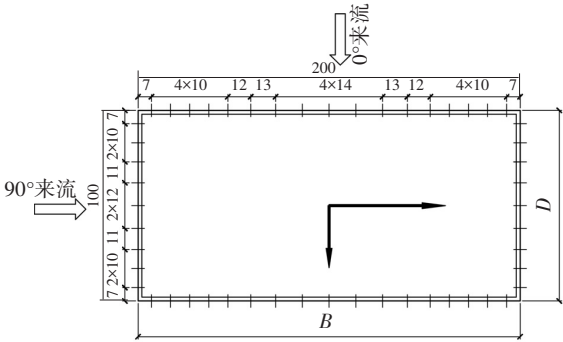


图 2 矩形截面测点布置 (mm)

Fig.2 Arrangement of the pressure taps on cross-section (mm)

1.2 风场模拟

紊流风场由尖塔、挡板和粗糙元模拟产生,得到建筑结构荷载规范^[7]中的 B、C 和 D 三类风场,见图 3.模拟的平均风速剖面与规范^[7]要求的 B、C 和 D 类地表一致,紊流度剖面比规范值稍大,但符合试验要求.图 3 中, z_g 为梯度风高度, z 为竖向高度, U_g 为梯度高度风速, U/U_g 为平均风速与梯度风速比值.

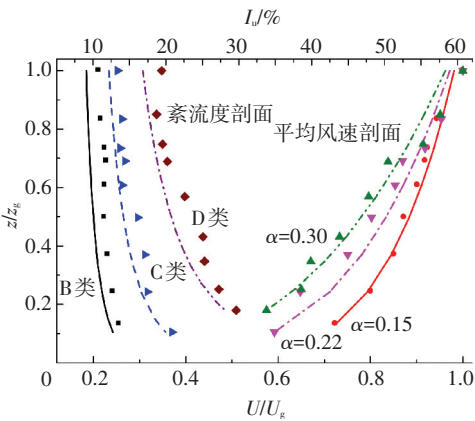


图 3 B、C 和 D 类风场模拟结果

Fig.3 Simulating wind-field of terrain roughness category B, C and D

本文采用两个 Cobra Probe 风速探头测量空间不同位置的脉动风速时程,测量间距为 0.03 ~ 1.62 m.图 4 以 10#断面高度为例,对 C 类风场顺风向脉动风速谱进行拟合(f 为风速频率).可见模拟风场的无量纲风速谱与 von-Karman 谱拟合较好,并通过拟合 Karman 谱获取顺风向紊流积分尺度.试验

风场对应的实际紊流积分尺度在 110~160 m 范围,与实际情况基本相符。

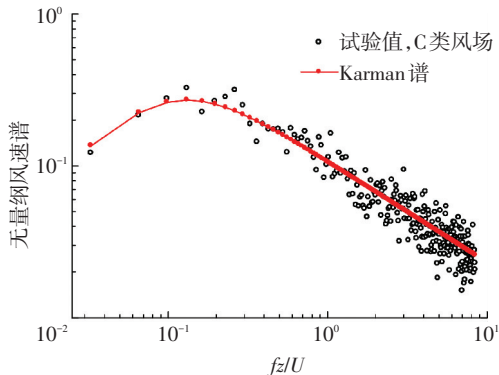


图 4 顺风向脉动风功率谱

Fig.4 The power spectrum of the longitudinal turbulence component

2 顺风向脉动风荷载相关性分析

2.1 脉动风竖向相关性及数学模型

频域内,脉动风的竖向相关性可由无量纲标准交叉谱来表达,一般可近似取标准交叉谱的实部简化表示:

$$\text{coh}(\Delta z, f) = \frac{|S_{uu}(z_1, z_2, f)|}{\sqrt{S_{uu}(z_1, f) S_{uu}(z_2, f)}}, \quad (1)$$

式中: S_{uu} 为互谱实部, S_u 为各位置点谱, f 为风速频率, $\Delta z = |z_2 - z_1|$ 。

Davenport^[2] 最早提出竖向风速相干函数表达式:

$$\text{coh}(\Delta z, f) = \exp(-c\Delta z f/U), \quad (2)$$

式中: $\text{coh}(\Delta z, f)$ 为脉动风速相干函数, c 为指数衰减系数,一般竖向建议 $c = 10$ ^[5],文中将作为待定系数拟合。

式(2)结构简单,应用广泛,但存在一定的缺陷:在低频区,即使间距很大,相干函数仍可接近 1,这与大量实测结果不符。Krenk^[6] 通过引入修正频率,提出了修正指数公式来解决上述问题,该修正是基于标准化的 Karman 谱模型,

$$\text{coh}(k_1, \gamma) = \frac{2}{\Gamma(\gamma)} \left[\left(\frac{k_1 \gamma}{2} \right)^\gamma K_\gamma(k_1 \gamma) - \left(\frac{k_1 \gamma}{2} \right)^{\gamma+1} K_{1-\gamma}(k_1 \gamma) \right], \quad (3)$$

式中: Γ 为伽玛函数, K_γ 和 $K_{1-\gamma}$ 为第二类修正 Bessel 函数, $k_1 = 2\pi f/U$ 为波数。当 $\gamma = 1/2$ 时,上式可简化为

$$\text{coh}(\Delta z, f) = \left(1 - \frac{c\Delta z f_x}{2U}\right) \exp\left(-\frac{c\Delta z f_x}{U}\right), \quad (4)$$

其中 f_x 为修正频率

$$f_x = f \cdot \sqrt{1 + (1/k_1 L)^2}. \quad (5)$$

长度模量 $L = 1.34L_u$, L_u 为脉动风顺风向积分尺度。高频和空间距离较小的标准交叉谱可用上述公式得到准确表示。但在低频和空间距离较大时,还需要发展更为精确的湍流理论,如快速畸变理论等。

采用式(1)对试验数据拟合,可得不同间距下的相干函数。采用非线性最小二乘法,根据式(2)~(4),对每类风场 55 个间距组合的风速相干函数进行拟合。结果表明: Davenport 模型的衰减系数可取为 10.4, Krenk 模型衰减系数取为 6。同时图 5 还给出了风速相干函数在不同风场中的分布趋势。结果表明,三类风场中的脉动风速相干函数分布规律基本一致,可认为受风场类型影响较小。

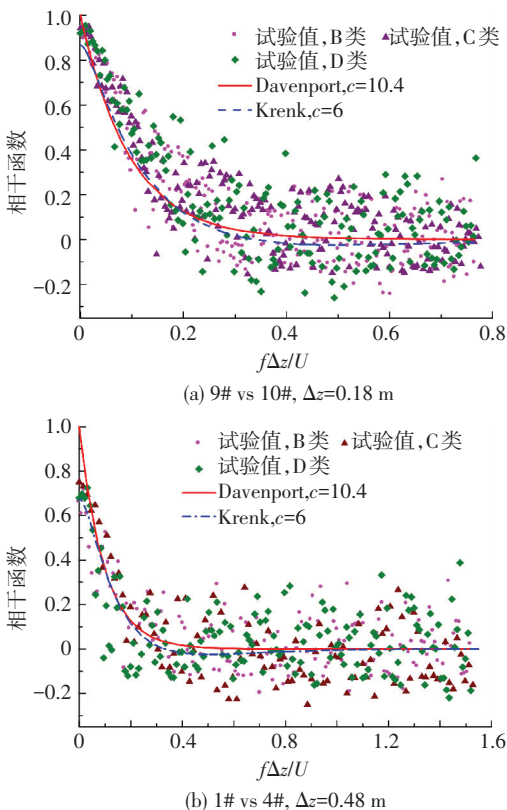


图 5 顺风向脉动风速相干函数

Fig.5 The coherence function of the longitudinal turbulence

2.2 顺风向脉动风荷载与脉动风相关系数对比

在频域内,一般采用相干函数^[9,10,16-17]描述空间任意两点脉动风荷载的相关度,而在时域内则采用相关系数来描述。在 0° 风向角下,矩形高层建筑的顺风向脉动风荷载相关系数随间距变化如图 6 所示。图 6 结果再次证实高层建筑脉动风荷载比脉动风速具有更强的相关性,与 Dyrbye^[1] 和 Kareem^[3] 结论一致。同时, B 类风场中顺风向脉动风荷载相关性要略强于 C、D 类风场,其原因可能是 B 类风场的紊流积分尺度略大于 C、D 类风场。图 6 中,横坐标为约化间距 $\Delta z/B$, B 为矩形断面迎风面宽度。

由于缺乏顺风向脉动风荷载在迎风面和背风面

的相关性数据,一般假定迎风面与背风面脉动风压全相关^[1],但该假定未得到有效验证.在此基础上,认为该假定可能产生的误差与采用脉动风速相关性代替脉动风荷载相关性产生的误差能在一定程度上相互抵消^[3].以上假定为高层建筑风振响应计算带来了不确定性,可能导致较大的计算误差.

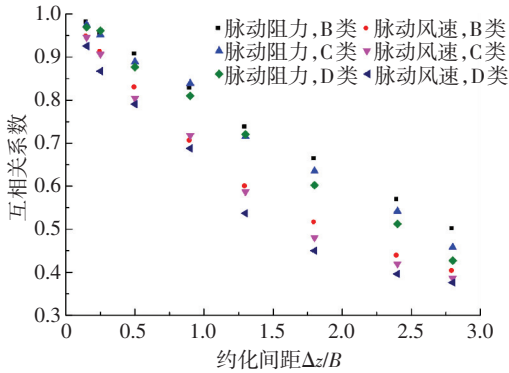


图 6 脉动风与顺风向风荷载相关系数对比

Fig.6 Comparison between the correlation coefficients of fluctuating along-wind loads and wind fluctuations

图 7 给出了 B 类风场 0° 风向角下,迎风面和背面相关系数沿竖向变化规律.发现迎风面脉动风压相关系数与矩形断面整体荷载趋势一致,但相关性会略小.随着间距增大,迎风面脉动压力相关系数会逐渐低于断面总体力.该结果表明顺风向脉动风荷载主要受迎风面脉动风压控制,但仅考虑迎风面脉动风压相关性则可能低估顺风向脉动风荷载.对于背风面,当竖向间距较小时,脉动压力相关性并不能完全忽略.当 $\Delta z/B > 1$,脉动风压相关系数快速衰减,明显小于迎风面和断面整体阻力.该结果表明若忽略迎风面和背风面脉动风压的弱相关性,即认为顺风向风荷载相关性仅与迎风面脉动风压有关,可能会引起高层建筑顺风向脉动风荷载取值偏不安全.采用已经反映了脉动风及其气动贡献、实际结构的风荷载相干函数,是获得更精确结构风荷载的有效方法.

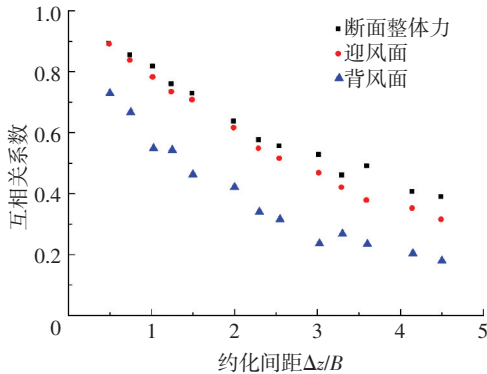


图 7 迎风面和背面脉动风压相关系数对比

Fig.7 Comparison of the correlation coefficients of fluctuating pressure between the windward side and the leeward side

2.3 脉动风荷载相干函数结果

通过测压试验,同步获得各测点的脉动风压时程,然后将各截面(或层)压力时程积分可得到顺风向脉动风荷载(脉动阻力).这里讨论的各层间脉动阻力相干特性已经考虑了脉动风速、迎风面和背风面脉动风压的综合影响.

图 8 给出了 0° 和 90° 风向角下,顺风向风荷载相干函数在高度方向(竖向)的变化情况.相干函数具有如下特性:1) 相干函数与频率、间距成反比,相干函数衰减量大小取决于旋涡尺寸;2) 间距较大时,相干函数在低频区取值小于 1,并随间距增大不断减小;3) 同一风场中,当间距组合的 $\Delta z/U$ 接近时,如:5# vs 6# 和 8# vs 10#, ($\Delta z/U \approx 0.03$ B 类和 D 类, $\Delta z/U \approx 0.04$ C 类),其相干函数具有基本一致的分布规律, $\Delta z/U$ 的值越大,衰减速率越大,表明顺风向脉动风荷载相干函数同时受竖向间距和紊流参数空间变化控制;4) 宽边迎风时相关性强于窄边迎风,宽厚比对顺风向脉动风荷载相关性存在一定影响;5) 风场类别对相干函数有一定影响,表现出高紊流度风场顺风向脉动风荷载相干函数衰减量更大,这可能是由于 B 类风场的积分尺度大于 C、D 类风场引起的.

3 脉动风荷载相干函数模型

文献[10–11,18]在传统脉动风速相干函数的基础上进行了一系列改进,应用较广泛的顺风向脉动风荷载相干函数模型为

$$\text{coh}(\Delta z, f) = \delta \exp\left(-\frac{c\Delta z f}{U}\right), \quad (6)$$

式中 δ 、 c 为待拟合参数.上式中,考虑了间距和频率对脉动风荷载相干函数的影响,可通过 δ 对低频值进行修正, δ 在 0~1 内取值.指数衰减系数 c 通过试验结果拟合,比较符合实际情况.式(6)相对于传统脉动风速相干函数模型已有较大改进,但仍需进一步完善:式中未考虑紊流风场空间变化对相干函数的影响,并在低频和间距较大或较小时未考虑频率修正,与实际结果存在一定偏差.

根据顺风向脉动风荷载相干函数分布特性,特别是反映脉动风荷载相关性高于脉动风速相关性这一事实,参考已有文献[6,10–11,18–19],提出矩形高层建筑顺风向脉动风荷载相干函数表达式:

$$\text{coh}(\Delta z, s, f) = \left(1 - \frac{\eta c(s) f' \Delta z}{U}\right) \exp\left(-\frac{c(s) f' \Delta z}{U}\right), \quad (7)$$

$$s = \Delta z B^{\alpha/2} / H^{1+\alpha/2}, \quad (8)$$

$$f' = \sqrt{f^2 + (U/2\pi L)^2}. \quad (9)$$

式中:无量纲参数 s 反映了迎风面宽度、风场类别和间距的综合影响, α 为风剖面指数, H 为模型高度, η 反映高频影响, f' 为修正频率, $c(s)$ 为指数衰减系数, $L=1.34L_0$, 系数 1.34 为 Karman 谱修正系数理论值^[11].

采用非线性最小二乘法,图 9 给出了 B 类风场 0° 风向角下的部分拟合结果.将式 (6) 和 Davenport 模型所代表的相干函数模型作为对比,同时给出了拟合结果.对比结果表明,本文给出的顺风向脉动风荷载相干函数公式具有更高的拟合精度.

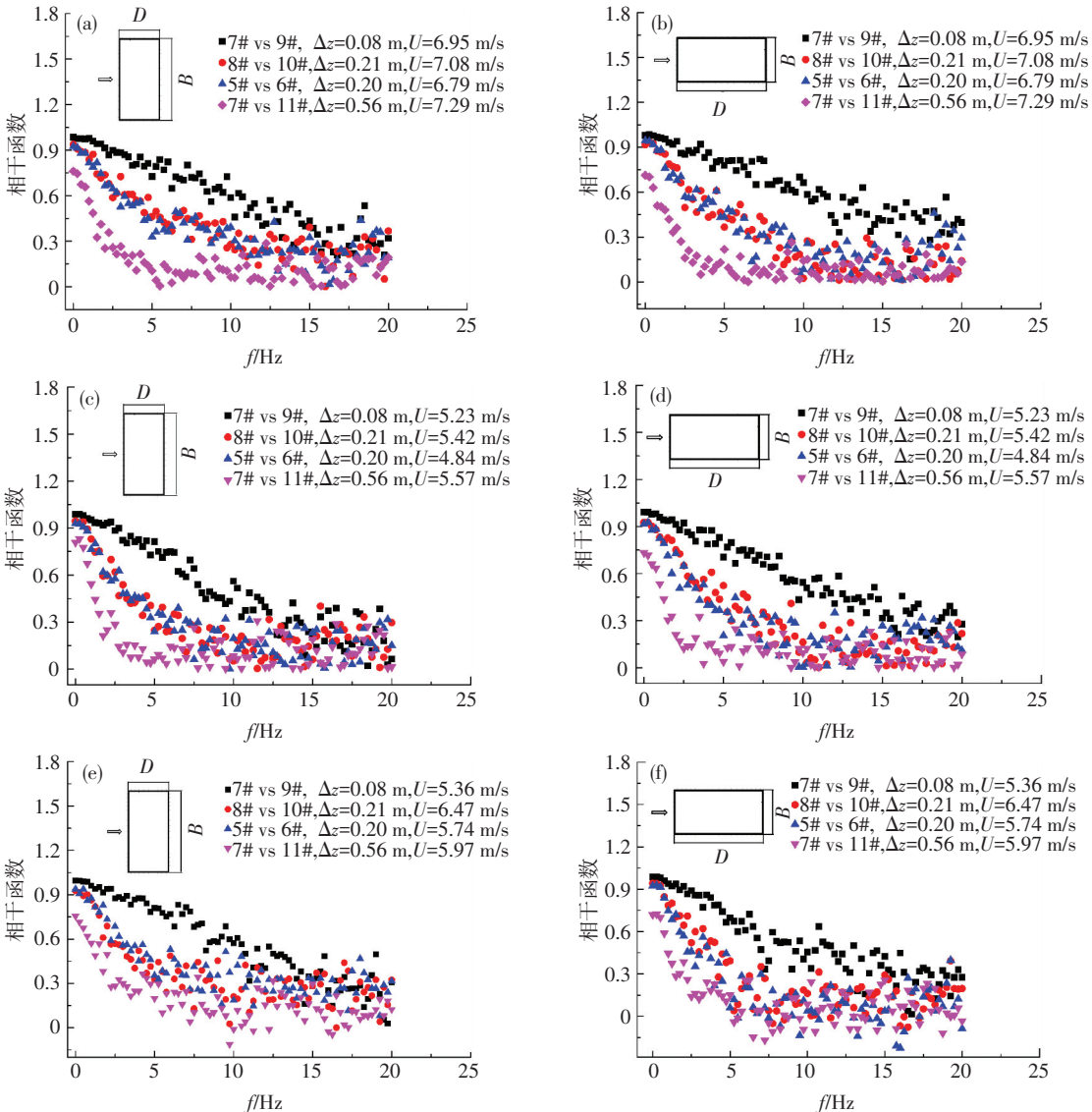


图 8 不同风场中顺风向脉动风荷载相干函数分布特性

Fig.8 The coherence function of fluctuating along-wind loads in different wind fields

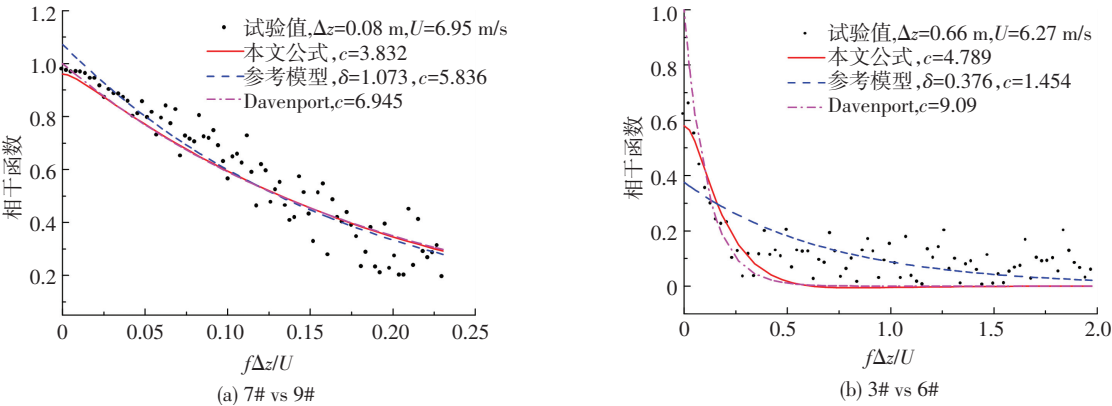


图 9 相干函数拟合曲线

Fig.9 Fitting curve of coherences of fluctuating along-wind loads

通过拟合, η 取值为常数, $\eta=1/3$. c 可用无量纲系数 s 的二次项表达式较好拟合,结果见图 10.

$$c(s)=-66.26s^2+27.39s+2.354. \quad (10)$$

图 11 以 B 类风场中 0° 风向角的部分组合为例,给出顺风向脉动风荷载相干函数随无量纲参数 s 的变化情况.本文结果符合实际相干函数空间分布规律,在低频,随着 s 增大,顺风向脉动风荷载相关性逐渐降低.此外,在考虑了紊流风场和结构特征尺寸修正后,本文模型在一定程度上克服了传统脉动风速相干函数的不足.

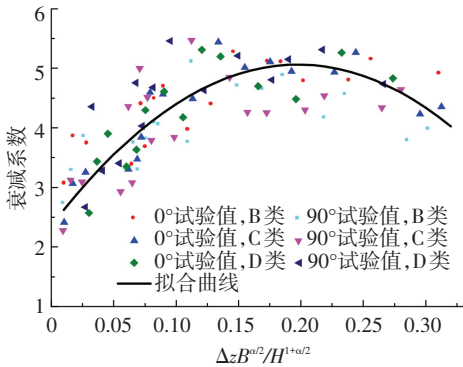


图 10 指数衰减系数 c 的拟合曲线

Fig.10 The fitting curve of the factor c

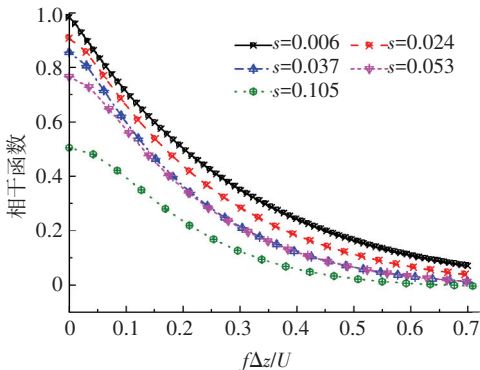


图 11 改进相干函数公式随参数 s 的变化趋势

Fig.11 The variation trend of the proposed coherence function formula with the parameter s

4 结 论

- 1)矩形高层建筑顺风向脉动风荷载相关性强于脉动风速的相关性.
- 2)矩形模型顺风向脉动风荷载相关性强于迎风面脉动风压的相关性,背风面脉动风压相关性较弱,但在小间距时不能完全忽略.
- 3)风场类别对脉动风速和顺风向脉动风荷载相关性有一定影响,相干函数在高紊流度风场中的衰减速率要大于低紊流度风场.
- 4)矩形高层建筑顺风向脉动风荷载相关性与频率、空间间距、紊流风场特性密切相关.其与频率和间距成反比,与紊流积分尺度成正比,同类风场

中,当相干函数的 $\Delta z/U$ 相同时,其相干函数分布基本一致.

5)本文给出的矩形高层建筑顺风向脉动风荷载相干函数经验公式对高层建筑脉动风荷载的精细化分析具有一定参考价值.

参考文献

[1] DYRBYE C, HANSEN S O. Wind loads on structures [M]. New York: Wiley, 1997.

[2] DAVENPORT A G. The application of statistical concepts to the loading of structures [J]. ICE Proceedings, 1961, 19(4): 449-472.DOI:10.1680/iicep.1961.11304.

[3] KAREEM A. Synthesis of fluctuating along wind loads on buildings [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1986, 112(1): 121-125.

[4] ESDU. Characteristic of atmospheric turbulence near the ground. part III: variations in space and time for strong winds; neutral atmosphere [M]. London: Engineering Sciences Data Unit, 1986.

[5] DAVENPORT A G. Gust loading factors [J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1967, 93: 11-34.

[6] KRENK S. Wind field coherence and dynamic wind forces [C]// IUTAM symposium on advances in nonlinear stochastic mechanics. Netherlands: Springer, 1996: 269-278.

[7] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工程出版社,2012.

Load code of the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[8] SHIOTANI M, AVAI H. Lateral structure of gusts in high winds [C]// International Conference on the Wind Effect on Buildings and Structures. Cambridge: Cambridge University Press, 1967:535-555.

[9] 顾明,张建国. 高层建筑顺风向脉动荷载相干性研究[J]. 土木工程学报,2008,41(11): 18-22.

GU Ming, ZHANG Jianguo. Coherence analysis of along-wind fluctuating loads on high-rise building [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11): 18-22.

[10] 黄东梅,朱乐东. 超高层建筑风力空间相干函数研究-分析归纳法[J]. 土木工程学报,2010,43(9):32-38.

HUANG Dongmei, ZHU Ledong. Study on spatial correlation functions of wind loads on a super-tall building-analysis and induction method [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(9): 32-39.

[11] LI S P, LI M S, LIAO H L. The lift on an aerofoil in grid-generated turbulence [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 771: 16-35.

[12] HANN F L. The effects of turbulence on the aerodynamics of long-span bridge [D]. South Bend Indiana: University of Notre Dame, 2000.

[13] LI Q S, MELBOURNE W H. The effect of large-scale turbulence on pressure fluctuations in separated and reattaching flows [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83: 159-169.

[14] KIMURA K, FUJINO Y, NAKATO H, et al. Characteristics of buffeting forces on flat cylinders [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 69/70/71: 365-374.

[15] LAROSE G L, MANN J. Gust loading on streamlined bridge decks [J]. Journal of Fluid and Structures, 1998, 12(5): 511-536.

[16] 顾明,叶丰. 典型超高层建筑风荷载频域特性研究[J]. 建筑结构学报,2006,27(1): 30-36.

GU Ming, YE Feng. Frequency domain characteristics of wind loads on typical super-tall buildings [J]. Journal of Building Structure, 2006, 27(1): 30-36.

[17] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind effects on structures: An introduction to wind engineering [M]. New York: Wiley, 1986.

[18] VICKERY B J, KAO K H. Drag or along-wind response of slender structures [J]. Journal of the Structural Division, 1972, 98(1): 21-36.

[19] LIANG S, LIU S, LI Q S, et al. Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12): 1757-1770.

(编辑 赵丽莹)