

上海陆家嘴地区高空台风“温比亚”风特性实测

傅国强,全涌[†],顾明,黄子逢

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

摘要:基于上海环球金融中心顶部超声风速仪记录的台风“温比亚”风速样本数据,对平均风特性和湍流强度、阵风因子、峰值因子、湍流积分尺度和功率谱密度等脉动风风特性参数进行了详细分析.结果表明:1 小时内 3 s、10 min 和 1 h 3 个时距的平均风速变化趋势一致.湍流强度呈现出随平均风速增加先下降后稳定的趋势,纵向和横向湍流强度均值分别为 0.135 和 0.132;阵风因子均随湍流度的增大而增大,两者呈现线性增加的趋势;湍流积分尺度随平均风速增加而没有明显的变化趋势;Von-Karman 谱能够较好地拟合本次台风实测纵向和横向风速谱.

关键词:台风;超高层建筑;现场实测;湍流强度;风特性

中图分类号:TU311.3

文献标志码:A

Field Measurement of Wind Characteristics of Typhoon Rumbia in upper Air of Lujiazui District at Shanghai

FU Guoqiang, QUAN Yong[†], GU Ming, HUANG Zifeng

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

Abstract:Based on the wind speed samples collected by the ultrasonic anemometers atop Shanghai World Financial Center during Typhoon Rumbia, the fluctuating wind characteristics parameters, such as the mean wind characteristics, turbulence intensity, gust factor, peak factor, turbulence integral scale, and power spectral density are analyzed in detail. It is found that the variation trends of the mean wind speed in 3 seconds, 10 minutes and 1 hour within an hour are consistent with each other. Turbulence intensity decreases first and then stabilizes with the augment of mean wind speed. The mean values of longitudinal and lateral turbulence intensity are 0.135 and 0.132, respectively. The gust factor increases linearly with the increase of turbulence intensity. The turbulence integral scale shows no obvious variable trend with the increase of the mean wind speed. The measured wind speed spectra agree well with the Von-Karman spectra.

Key words: typhoons; super high-rise building; field measurement; turbulence intensity; wind characteristics

* 收稿日期:2019-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778493), National Natural Science Foundation of China(51778493); 土木工程防灾国家重点实验室自主课题(SLDRCE19-A-05, SLDRCE19-B-13), The Key Project of State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering(SLDRCE19-A-05, SLDRCE19-B-13)

作者简介:傅国强(1995—),男,广东韶关人,同济大学博士研究生

[†] 通信联系人, E-mail: quanyong@tongji.edu.cn

近年来,随着全球气候变暖,各种极端气候事件频发.2018年第21号超强台风“飞燕”登陆日本,最大瞬时风速达57.4 m/s,造成了重大人员伤亡和财产损失,被日本称为25年来最强大的台风.我国东南沿海地区也是世界上受台风影响最严重的地区之一,仅2018年7月、8月两个月,就有5次台风先后登陆福建、上海和浙江.上海更是成为我国有气象记录以来首个30 d内有3个台风正面登陆的城市.

台风风场与常规风场有很大差异,在风洞试验中很难进行模拟,因此现场实测是现阶段最直接和最有效的研究手段,也是风工程研究中非常重要的基础性和长期性的研究方向^[1].风工程研究发达的国家基于长期的现场实测数据建立起本地区的风特性数据库,如挪威^[2]、英国^[3]、加拿大^[4]等都建有近海观测数据库.美国圣母大学^[5-6]对芝加哥4栋高层建筑进行了长期的现场实测研究.近年来国内学者也开展了大量的实测研究,取得了一些进展.文献[7-12]在深圳平安金融中心、广州西塔、台北101等数十栋超高层建筑开展了多次现场实测研究,详细地分析了这些超高层建筑在台风作用下顶部的平均风速、风向、湍流度、阵风因子、峰值因子、湍流积分尺度和脉动风功率谱密度等风场特性和动力特性.Xu等^[13]在深圳地王大厦对强风的平均和脉动特性,以及结构在强风下的响应进行了研究,并给出了相关的经验拟合公式;Guo等^[14]通过在广州塔所布置的结构健康监测对3次台风作用下的平均风速、风向、湍流度等风特性和结构响应进行研究,与风洞试验对比并评估了舒适度.史文海等^[15]对厦门某超高层建筑在某次台风作用下的风场和建筑表面风压进行了同步实测,对湍流度、阵风因子、脉动风功率谱以及平均风压系数和脉动风压系数进行了系统的研究.梁枢果等^[16]对武汉某超高层建筑在良态风作用下的顶部风速与表面风压进行现场实测.何宏明等^[17]利用台风“海马”登陆中心的观测塔的风速仪设备对不同高度处的风场特征参数进行了分析.张志田等^[18]对江底河大桥桥址处深切峡谷的风场特性进行研究,详细分析了深切峡谷地形特征对风速风向及湍流特性的影响.沈炼等^[19]对某山区峡谷桥址处风场进行了现场实测和数值模拟研究,得到了峡谷桥址处风场的详细分布特性.尽管许多学者在台风风特性实测方面做了大量的工作,并且在我国华南地区取得了丰硕成果,但是由于现场实测费用大、周期长、难度大,目前人们对台风风特性的认识还远不清楚.

上海地区纬度相对较高,直接登陆的台风很少,

因此在上海进行台风风特性现场实测对我国华东地区台风风特性的研究和扩充上海地区高空风速数据库具有非常重要的意义.本文利用上海环球金融中心顶部(497 m)超声波风速仪采集到的台风“温比亚”风速数据,对平均风速、湍流强度、阵风因子、峰值因子、湍流积分尺度和脉动风功率谱进行了详细地分析.研究成果可为相近地区的超高层建筑抗风设计提供参考.

1 台风“温比亚”及现场实测概况

2018年第18号台风“温比亚”(英文名:Typhoon Rumbia)于8月15日14时在东海东南部生成.8月16日21时加强为强热带风暴.8月17日4时在上海市浦东新区南部沿海登陆.登陆时由强热带风暴级减弱为热带风暴级,中心附近最大风力为9级,中心最低气压98.5 kPa.台风“温比亚”登陆后向西偏北方向移动,强度逐渐减弱,在黄海北部海面变性为温带气旋,并于8月21日2时停止编号.在台风“温比亚”经过上海过程中,其先从东南方向逐渐靠近观测地点;8月17日5时其路径中心距离观测地点最近,距离达到18 km;随后其逐渐向西并远离观测地点.

上海环球金融中心(图1)位于上海市陆家嘴金融核心区,结构高度为492 m,地上共有101层.金茂大厦(420.5 m)和上海中心(632 m)分别位于环球金融中心的西北部和西南部,除此之外其周围还密集分布有大量高层与超高层建筑,这使得环球金融中心的近地风特性极其复杂.

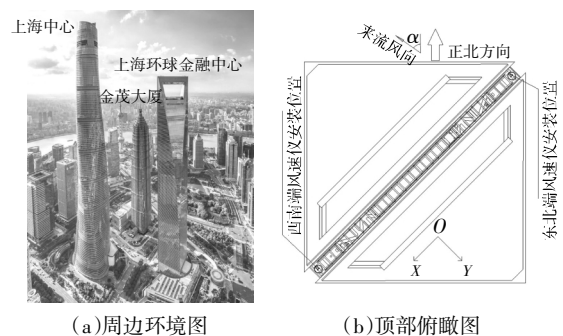
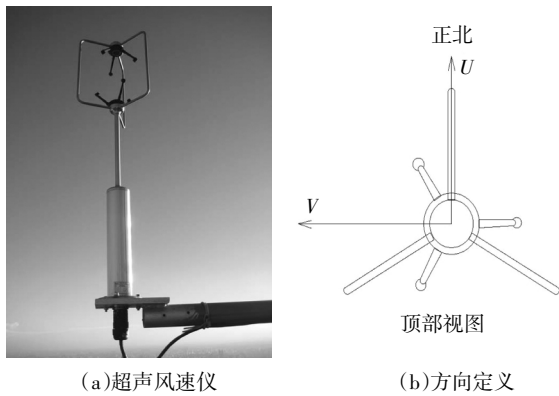


图1 上海环球金融中心周边环境和顶部俯瞰图

Fig.1 Surroundings and top view of the Shanghai World Financial Center

风速监测系统的观测点设置在上海环球金融中心101层东北端和西南端,两侧均安装有一台英国Gill公司生产Windmaster Pro超声波风速仪(图1和图2),离地高度约494 m,两端仪器间距约72 m.超声波风速仪的3个分量 U, V, W 分别对应正北、正西和竖

直向上,风向角按俯视逆时针方向递增,以南风为 0° ,东风为 90° ,如图2所示.超声波风速仪风速量程为 $0.01\sim 65\text{ m/s}$,采样频率为 10 Hz ,采样得到的数据通过Campbell公司生产的CR3000数据采集系统实时存储.为避免来流风受到环球金融中心顶部女儿墙、擦窗机、建筑本身等绕流影响,经过计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)计算得知,当来流方向在以东北角和西南角连线为平分线 22.5° 范围内可忽略绕流影响,即东北端有效风向角为 $112.5^\circ\sim 157.5^\circ$,西南端有效风向角为 $292.5^\circ\sim 337.5^\circ$.



(a)超声风速仪 (b)方向定义
图2 超声波风速仪

Fig.2 Windmaster pro ultrasonic anemometer

2 台风“温比亚”风特性分析

2.1 平均风特性

选取东北端超声风速仪从2018年8月15日20:00至8月17日16:00采集得到的共44h的风速时程数据作为平均风特性分析样本.本文利用矢量分解法^[20]对采集得到的风速数据进行处理,得到平均水平风速 U 和平均水平风向角 Φ .由于风速的竖向分量对高层建筑影响较小,所以这里不考虑竖向平均及脉动风速.根据中国《建筑结构荷载规范》^[21],本文以10min作为分析时距,可得到264个连续的10min风速时程样本.图3和图4分别为东北端纵向10min平均风速和10min平均风向角变化情况.

从图3中可以看到,10min平均风速随着时间呈现出先升高后降低的趋势.2018年8月16日10时至8月17日2时,10min平均风速从 11.33 m/s 逐渐增大,最大风速达到 22.52 m/s ,随后逐渐减小到 3 m/s 左右.从图4中可以看到,10min平均风向角先在 120° 至 180° 左右波动,随着台风“温比亚”登陆和远离上海,平均风向角瞬间增大至 270° ,之后逐渐稳定在 190° 左右.

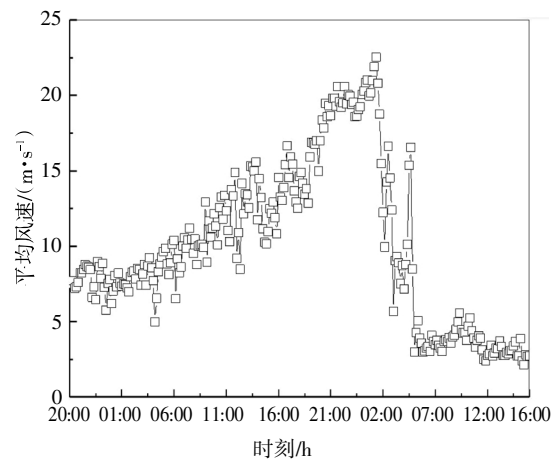


图3 10 min 平均风速
Fig.3 10 min mean wind speed

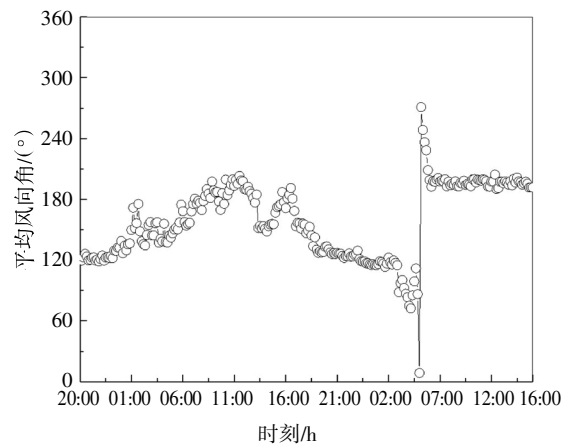


图4 10 min 平均风向角
Fig.4 10 min mean wind direction

结构抗风设计中,不同时距平均风速的相互关系具有重要工程价值和理论意义.张相庭^[22]根据国内外学者对不同时距平均风速的研究比较,统计得到近似比值关系,如表1所示.

表1 不同时距平均风速近似比值关系

Tab.1 The approximate ratio of the mean wind speed with different time interval

风速时距	1 h	10 min	1 min	30 s	20 s	10 s	3 s	瞬时
统计比值	0.94	1.00	1.20	1.26	1.28	1.35	1.42	1.50

图5为1h内时距分别为3s、10min和1h的平均风速变化情况.可以看到,3s、10min、1h3个时距的平均风速变化趋势一致.随着时距减小,最大平均风速逐渐增大,其中1h内3s最大平均风速为 29.10 m/s ,发生在2018年8月17日5时.

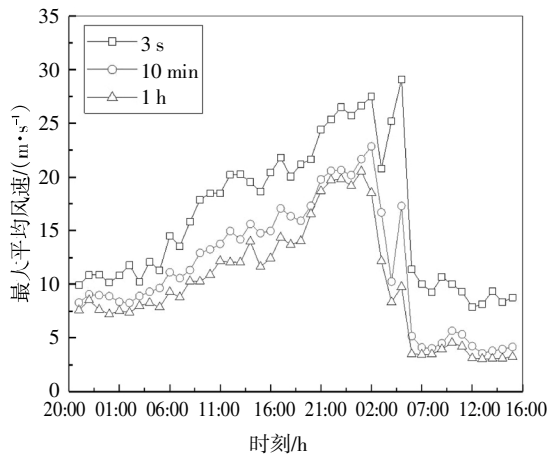


图 5 1 h 内不同时距最大平均风速
Fig.5 Maximum mean wind speeds in 1 h with different time interval

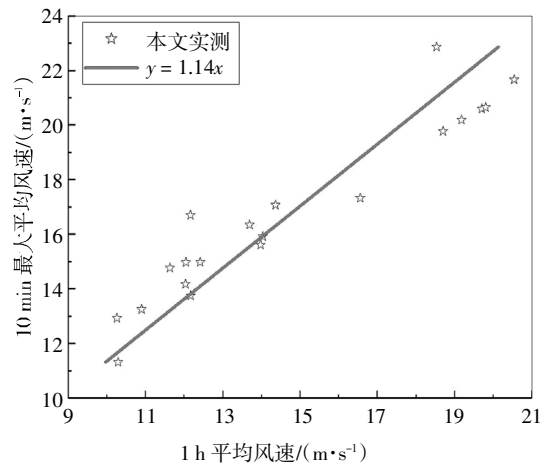


图 7 10 min 最大平均风速随 1 h 平均风速变化关系
Fig.7 Maximum 10 min mean wind speed versus 1 h mean wind speed

图 6 和图 7 分别为 3 s 最大平均风速随 10 min 平均风速变化关系和 10 min 最大平均风速随 1 h 平均风速变化关系. 从图中可以看出, 3 s 最大平均风速与 10 min 平均风速和 10 min 最大平均风速与 1 h 平均风速均呈现出很好的线性关系. 本文实测结果与张相庭^[22]的统计近似比值存在一定的差距, 这应该是观测高度差异所导致的. 本研究观测高度离地近 500 m, 风速的湍流强度应该低于离地高度较小的区域, 这导致短观测时距和长观测时距的最大风速之比减小.

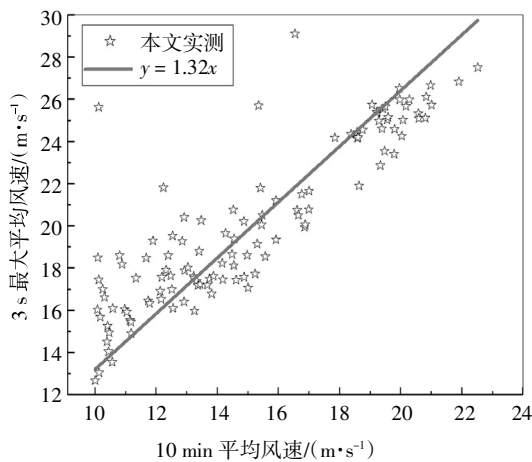


图 6 3 s 最大平均风速随 10 min 平均风速变化关系
Fig.6 Maximum 3 s mean wind speed versus 10 min mean wind speed

2.2 脉动风特性

本文选取 2018 年 8 月 16 日 13:30 至 8 月 17 日 03:00 东北端采集得到的有效风向角范围内的数据进行分析. 下文中如无特殊说明, 分析时距均为 10 min.

2.2.1 湍流强度

湍流强度描述了风速随时间变化的程度, 反映了脉动风的相对强度, 是描述脉动风特性的重要参数. 湍流强度通常定义为 10 min 时距内脉动风速标准差与水平平均风速 U 的比值.

$$I_i = \frac{\sigma_i}{U} \quad (i = u, v) \quad (1)$$

式中: $I_i (i = u, v)$ 分别为纵向和横向湍流强度; $\sigma_i (i = u, v)$ 分别表示脉动风速 $u(t)$ 和 $v(t)$ 在 10 min 时距内的标准差. 图 8 为纵向和横向湍流强度随 10 min 平均风速变化的关系. 从图中可以看出, 当 10 min 平均风速小于 16 m/s 时, 纵向和横向湍流强度均随着 10 min 平均风速增加而下降, 但当 10 min 平均风速大于 16 m/s 后两者却没有明显的变化趋势.

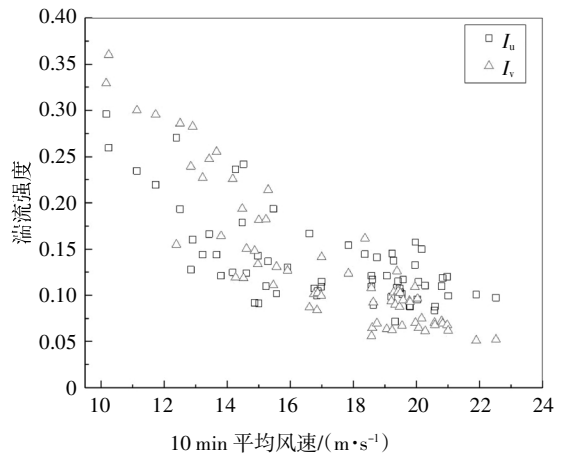


图 8 湍流强度与 10 min 平均风速的关系
Fig.8 Turbulence intensities versus 10 min mean wind speed

纵向和横向湍流强度均值分别为 $\bar{I}_u = 0.135, \bar{I}_v =$

0.132,两者比值为 $\bar{I}_u : \bar{I}_v = 1 : 0.98$. An 等^[23]、Quan 等^[24]和黄子逢等^[25]分别分析了在台风“梅花”作用下,良态强风作用下和台风“灿鸿”作用下环球金融中心顶部湍流强度随 10 min 平均风速变化情况,表 2 为 4 次现场实测结果对比.从表 2 可知,本文实测的湍流强度与 An 等实测结果接近,与 Quan 等、黄子逢等实测结果存在差异.这是因为 Quan 等只对良态强风进行了分析;黄子逢等则忽略了平均风速较低的数据,只分析了 10 min 平均风速大于 16 m/s 的样本.4 次实测结果都呈现了湍流强度随平均风速增加而减小的规律.日本建筑荷载规范^[26]中地貌相似(V类)、高度相同处(494 m)的纵向湍流强度约为 0.11,中国建筑结构荷载规范中相同地貌(D类)、相同高度(494 m)的纵向湍流强度为 0.12,本文实测结果比两者略大.

表 2 实测湍流强度对比

Tab.2 Comparison of turbulence intensities

研究方法	风场类型	I_u	I_v	$I_u : I_v$
An 等 ^[23]	台风“梅花”	0.14	0.13	1 : 0.93
Quan 等 ^[24]	良态强风	0.085	0.075	1 : 0.88
黄子逢等 ^[25]	台风“灿鸿”	0.107	0.066	1 : 0.62
本文方法	台风“温比亚”	0.135	0.132	1 : 0.98

2.2.2 阵风因子

风速的极值特性是风特性分析中十分重要的部分.阵风因子反映了阵风风速与平均风速之比,定义为阵风持续时间 t_g (本文取 3 s)内最大平均风速与分析时距(10 min)的水平平均风速 U 之比,即

$$G_u(t_g) = 1 + \frac{\max(\bar{u}(t_g))}{U} \quad (2)$$

$$G_v(t_g) = \frac{\max(\bar{v}(t_g))}{U} \quad (3)$$

式中: $G_i(t_g)(i = u, v)$ 分别为纵向和横向阵风因子; $\max(\bar{u}(t_g))$ 和 $\max(\bar{v}(t_g))$ 分别表示纵向和横向脉动风在分析时距(10 min)内阵风持续时间 t_g 的最大平均风速.图 9 为纵向和横向阵风因子 G_u, G_v 随 10 min 平均风速变化情况.从图中可以看出, G_u 随平均风速增加没有明显的变化趋势, G_v 则先随着平均风速的增加而逐渐减小,当 10 min 平均风速大于 16 m/s 后逐渐趋于稳定. G_u, G_v 平均值分别为 1.26、0.37,两者比值为 $\bar{G}_u : \bar{G}_v = 1 : 0.29$. An 等, Quan 等和黄子逢等也对阵风因子进行了分析,见表 3.从表中可以看出,本文实测结果与 An 等实测结果接近, G_u 和 G_v

与 Quan 等实测结果相差比较大, G_v 与黄子逢等实测结果存在差异,原因与上文中湍流强度存在差异的原因相同.

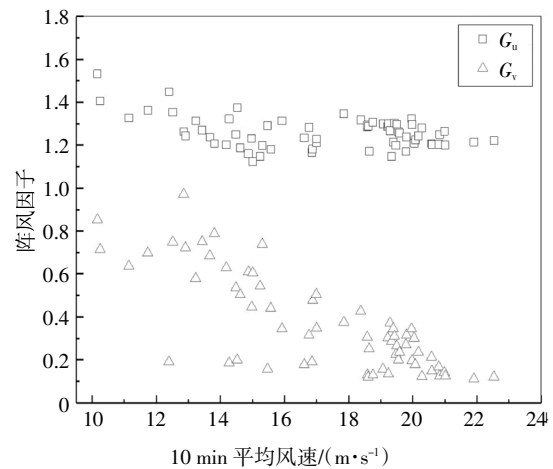


图 9 阵风因子与 10 min 平均风速关系

Fig.9 Gust factors versus 10 min mean wind speed

表 3 实测阵风因子对比

Tab.3 Comparison of gust factors

研究方法	风场类型	G_u	G_v	$G_u : G_v$
An 等 ^[23]	台风“梅花”	1.28	0.31	1 : 0.24
Quan 等 ^[24]	良态强风	1.15	0.17	1 : 0.15
黄子逢等 ^[25]	台风“灿鸿”	1.23	0.18	1 : 0.15
本文方法	台风“温比亚”	1.26	0.37	1 : 0.29

阵风因子和湍流度之间的关系是风特性分析中重要的脉动参数关系.图 10 为纵向和横向阵风因子与湍流强度之间的关系,从图 10 可知,纵向和横向的阵风因子均随着湍流强度增加而增加. Cao 等^[27]和 Li 等^[28]利用实测数据对阵风因子和湍流强度的经验关系式进行了线性和非线性拟合,表达式可统一为:

$$G_u = 1 + aI_u^b \ln(T/t_g) \quad (4)$$

式中: a 和 b 均为待拟合参数; T 为分析时距,取 10 min; t_g 为阵风持续时间,本文取 3 s.本文分别对纵向和横向阵风因子与湍流强度的关系进行线性和非线性拟合.线性拟合结果为 $G_u = 1.21I_u + 1.09, G_v = 2.61I_u + 0.02$;非线性拟合结果为 $G_u = 1 + 0.19I_u^{0.67} \ln(600/3), G_v = 0.60I_v^{1.09} \ln(600/3)$.从图 10 可知, G_u 与线性和非线性拟合结果接近, G_v 在低湍流强度时吻合得很好,随着湍流强度增加阵风因子略呈发散趋势.总体上 G_u 和 G_v 随着湍流强度的增加而呈现线

性增加的趋势.

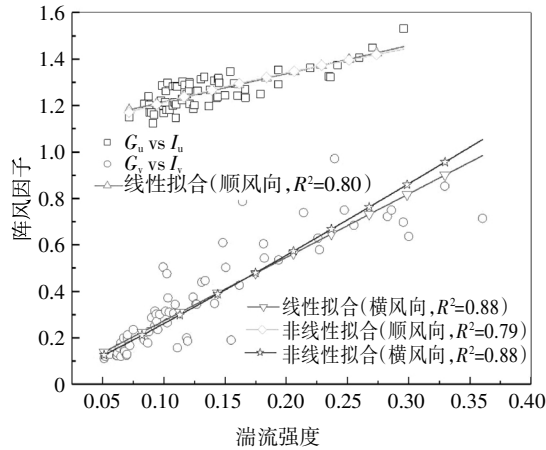


图 10 湍流强度与阵风因子关系

Fig.10 Gust factors versus turbulence intensities

2.2.3 峰值因子

峰值因子也是反映风速极值特性的重要参数. 峰值因子表征了脉动风速的瞬时强度, 定义为:

$$g_u = (\hat{U}_t - \bar{U}) / \sigma_u \quad (5)$$

式中: g_u 为峰值因子; \hat{U}_t 为分析时距 (10 min) 内阵风持续时间 t_g (3 s) 最大平均风速; σ_u 为分析时距内脉动风速 $u(t)$ 标准差. 图 11 为峰值因子随 10 min 平均风速变化的情况. 从图中可以看到, 峰值因子在平均风速小于 16 m/s 时受平均风速影响的规律性不明显. 当平均风速大于 16 m/s 时, 峰值因子呈现出随平均风速先增大后减小, 并逐渐趋于稳定. 总体来看, 峰值因子呈现出随着 10 min 平均风速增大而略微增大的趋势, 变化区间为 [1.33, 2.91], 平均值为 1.98. 表 4 为 4 次实测峰值因子均值的对比. 本次实测结果峰值因子均值稍低. 4 次实测结果的峰值因子均有随着 10 min 平均风速增大而增大的趋势.

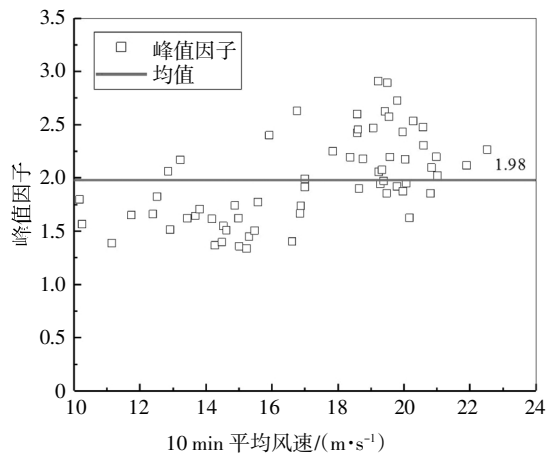


图 11 峰值因子与 10 min 平均风速关系

Fig.11 Peak factors versus 10 min mean wind speed

表 4 实测峰值因子对比

Tab.4 Comparison of peak factors

研究方法	风场类型	g_u
An 等 ^[23]	台风“梅花”	2.11
Quan 等 ^[24]	良态强风	2.06
黄子逢等 ^[25]	台风“灿鸿”	2.11
本文方法	台风“温比亚”	1.98

2.2.4 湍流积分尺度

湍流积分尺度定义了若干具有一定特征的代表性的涡旋尺度来表征湍流中涡旋的平均尺度. 本文采用基于 Taylor 假设自相关函数法计算纵向和横向脉动风速的湍流积分尺度. 计算公式为:

$$L_i^x = \frac{U}{\sigma_i^2} \int_0^{0.05\sigma_i^2} R_i(\tau) d\tau \quad (i = u, v) \quad (6)$$

式中: L_i^x ($i = u, v$) 分别为纵向和横向湍流积分尺度; U 为 10 min 平均风速; $R_i(\tau)$ ($i = u, v$) 为脉动风速的自相关函数; σ_i^2 ($i = u, v$) 为脉动风速的方差. 图 12 为纵向和横向湍流积分尺度随 10 min 平均风速变化情况. 从图中可以看出, 两个方向的湍流积分尺度随 10 min 平均风速增加而没有明显的变化趋势, 纵向和横向湍流积分尺度的平均值分别为: 261.06 m 和 136.93 m, $L_u : L_v = 1 : 0.52$. 表 5 为 4 次实测结果对湍流积分尺度的对比. 从表中可以看出, 不同实测结果得到的湍流积分尺度之间较大的差异, 原因可能是 An 等现场实测时环球金融中心周边建筑环境与现在存在较大的差别; Quan 等由于只是对良态强风进行分析而季风和台风之间的湍流结构存在明显的差异; 黄子逢等通过拟合广义风速谱的方法所求的纵向和横向湍流积分尺度, 其结果均偏小. 根据日本建筑荷载规范计算环球金融中心顶部 (497 m) 的纵向湍流积分尺度为 405.79 m, 本文实测结果偏小.

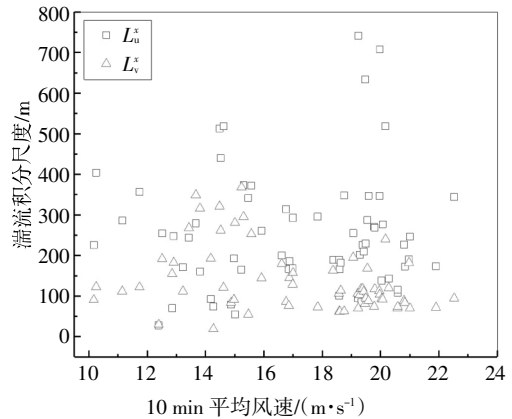


图 12 湍流积分尺度与 10 min 平均风速关系

Fig.12 Turbulence integral length scale versus 10 min mean wind speed

表 5 实测湍流积分尺度对比

Tab.5 Comparison of turbulence integral length

研究方法	风场类型	L_u	L_v	$L_u : L_v$
An 等	台风“梅花”	217.60	117.98	1 : 0.54
Quan 等	良态强风	212.23	198.28	1 : 0.93
黄子逢等	台风“灿鸿”	187.00	72.00	1 : 0.39
本文方法	台风“温比亚”	261.06	136.93	1 : 0.52

2.2.5 脉动风功率谱

脉动风功率谱密度描述了湍流中不同尺度的涡的动能对湍流脉动动能的贡献,它在频域上的分布代表了湍动能在不同尺度上的能量分布比例.各国学者提出了几种具有代表性的拟合经验功率谱,分别为达文波特谱、冯卡门谱、卡曼谱以及哈里斯谱.冯卡门(Von-Karman)谱的表达式为:

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4nL_u^*/U}{[1 + 70.8(nL_u^*/U)^2]^{5/6}} \quad (7)$$

$$\frac{nS_v(n)}{\sigma_v^2} = \frac{4nL_v^*/U[1 + 755.2(nL_v^*/U)^2]}{[1 + 283(nL_v^*/U)^2]^{11/6}} \quad (8)$$

式中: $S_u(n)$ 和 $S_v(n)$ 分别为纵向和横向脉动风功率谱密度; σ_u^2 和 σ_v^2 分别为相应的脉动风速方差; n 为脉动风速频率.图 13 和图 14 分别为实测得到不同平均风速下纵向和横向的归一化平均脉动风功率谱.从图中可以看出, 高速样本在高频段谱值比低速样本大, 在惯性子区内衰减速率也比低速样本缓慢; 不同平均风速下纵向和横向脉动风功率谱和相应的 Von-Karman 谱均吻合得很好, 在高频部分略大于 Von-Karman 谱.

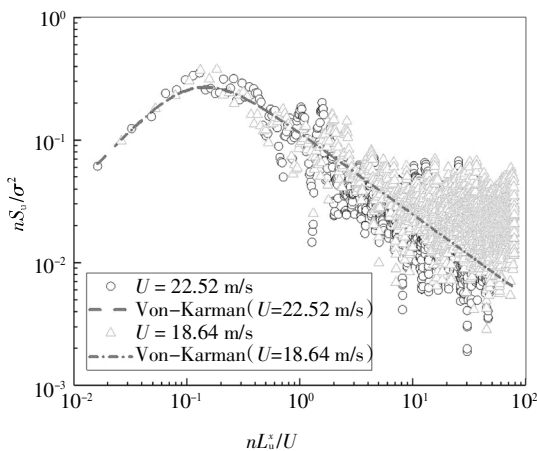


图 13 归一化纵向脉动风功率谱密度
Fig.13 Normalized power spectra density of longitudinal fluctuating wind speed

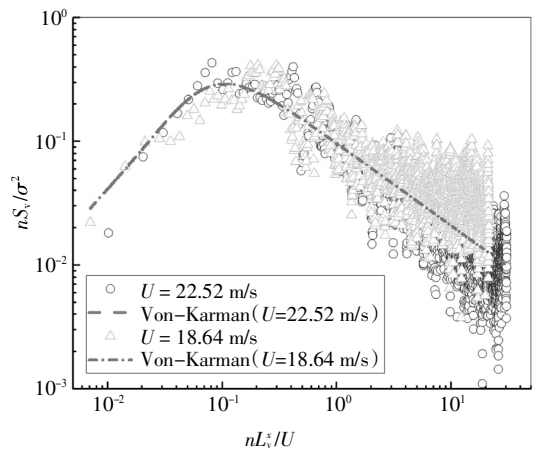


图 14 归一化横向脉动风功率谱密度
Fig.14 Normalized power spectra density of lateral fluctuating wind speed

3 结论

本文通过对台风“温比亚”登陆上海前后上海环球金融中心顶部东北端超声风速仪记录的风速时程数据进行分析,可以得到以下结论:

1)3 s 最大平均风速与 10 min 平均风速呈现出较好的线性关系: $y = 1.32x$; 10 min 最大平均风速与 1 h 平均风速也呈现出很好的线性关系: $y=1.14x$. 本文实测结果与张相庭^[22]的近似统计比值存在一定的差距.

2)纵向和横向湍流强度均值分别为 0.135 和 0.132, 比值为 $\bar{I}_u : \bar{I}_v = 1 : 0.98$. 湍流强度随着平均风速增加而下降, 但当平均风速大于 16 m/s 后却没有明显的变化趋势. 本文实测结果比中国规范和日本规范略大.

3)纵向和横向阵风因子均值分别为 1.26 和 0.37, 比值为 $\bar{G}_u : \bar{G}_v = 1 : 0.29$. G_u 随平均风速增加没有明显的变化趋势, G_v 随着平均风速的增加而逐渐减小. 纵向和横向的阵风因子与湍流强度的线性拟合结果与非线性拟合结果吻合较好, 表明 G_u 和 G_v 随着湍流强度的增加而呈现线性增加的趋势.

4)峰值因子呈现出随着平均风速增大而增大的趋势. 峰值因子的变化区间为 [1.33, 2.91], 均值为 1.98.

5)纵向和横向湍流积分尺度均值分别为 261.06 m、136.93 m, 比值为 $L_u : L_v = 1 : 0.52$. 湍流积分尺度随平均风速增加而没有明显的变化趋势.

6)实测台风“温比亚”纵向和横向脉动风功率谱与 Von-Karman 谱吻合得很好.

参考文献

- [1] 顾明. 土木结构抗风研究进展及基础科学问题[R]. 北京: 科学出版社, 2006: 382—403.
GU M. The research process and basic scientific issues about civil structure [R]. Beijing: Science Press, 2006: 382—403. (In Chinese)
- [2] ANDERSEN O J, LØVSETH J. The Frøya database and maritime boundary layer wind description [J]. *Marine Structures*, 2006, 19(2): 173—192.
- [3] WILLS J A B, GRANT A, BOYACK C F. Offshore mean wind profile [R]. London: Department of Energy, 1986: 86—226.
- [4] MCCLINTOCK J D, POND G S, DACIDSON L W. Offshore wind gust climatologies, sea consult limited, report prepared for atmospheric environment [R]. Ottawa: Canadian Climate Service Center Marine Applied Unit, 1998: 97—109.
- [5] KJIEWSKI-CORREA T L. Full-scale measurements and system identification; a time frequency perspective [D]. Notre Dame: The University of Notre Dame, 2003: 404—433.
- [6] KJIEWSKI-CORREA T L, PIRNIA J D. Dynamic behavior of tall buildings under wind; insights from full-scale monitoring [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2007, 16(4): 471—486.
- [7] ZHANG J W, LI Q S. Field measurements of wind pressures on a 600 μm high skyscraper during a landfall typhoon and comparison with wind tunnel test [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 175(12): 391—407.
- [8] ZHANG J W, LI Q S. Wind tunnel test and field measurement study of wind effects on a 600 m high super-tall building [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2017, 26(11): 1385—1401.
- [9] FU J Y, WU J R, XU A, *et al.* Full-scale measurements of wind effects on Guangzhou West Tower [J]. *Engineering Structures*, 2012, 35(1): 120—139.
- [10] LI Q S, ZHI L H, TUAN A Y, *et al.* Dynamic behavior of Taipei 101 tower: field measurement and numerical analysis [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(1): 143—155.
- [11] LI Q S, FU J Y, XIAO Y Q, *et al.* Wind tunnel and full-scale study of wind effects on China's tallest building [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(12): 1745—1758.
- [12] LI Q S, XIAO Y Q, WU J R, *et al.* Typhoon effects on super-tall buildings [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 313(3/4/5): 581—602.
- [13] XU Y L, ZHAN S. Field measurements of di Wang tower during typhoon york [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(1): 73—93.
- [14] GUO Y L, KAREEM A, NI Y Q, *et al.* Performance evaluation of Canton Tower under winds based on full-scale data [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 104/105/106: 116—128.
- [15] 史文海, 李正农, 罗叠峰, 等. 台风“鲑鱼”作用下厦门沿海某超高层建筑的风场和风压特性实测研究 [J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(1): 1—9.
SHI W H, LI Z N, LUO D F, *et al.* Field measurements of boundary layer wind field and wind pressure characteristics of a super-tall building on Coast of the Xiamen City during passage of typhoon Megi [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(1): 1—9. (In Chinese)
- [16] 梁枏果, 彭晓辉, 王磊, 等. 良态风作用下超高层建筑风压特性现场实测与风洞试验对比研究 [J]. *土木工程学报*, 2015, 48(5): 35—43.
LIANG S G, PENG X H, WANG L, *et al.* Comparative study between field measurement and wind tunnel test for wind pressure on Wuhan International Stock Building [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(5): 35—43. (In Chinese)
- [17] 何宏明, 雷旭, 聂铭, 等. 台风“海马”登陆中心近地风场特性实测研究 [J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(10): 29—36.
HE H M, LEI X, NIE M, *et al.* Field measurement research of near ground wind field characteristics at landing center during typhoon ‘Haima’ [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(10): 29—36. (In Chinese)
- [18] 张志田, 谭卜豪, 陈添乐. 丘陵地区深切峡谷风特性现场实测研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(7): 113—122.
ZHANG Z T, TAN B H, CHEN T L. Study on field measurement of wind properties near a canyon deep-cut to hilly land [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(7): 113—122. (In Chinese)
- [19] 沈炼, 韩艳, 蔡春声, 等. 山区峡谷桥址处风场实测与数值模拟研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(7): 16—24.
SHEN L, HAN Y, CAI C S, *et al.* Experiment and numerical simulation for wind field of a long-span suspension bridge located in mountainous canyon [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(7): 16—24. (In Chinese)
- [20] 项海帆, 葛耀君, 朱乐东, 等. 现代桥梁抗风理论与实践 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 7—47.
XIANG H F, GE Y J, ZHU L D, *et al.* Modern theory and practice on bridge wind resistance [M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 7—47. (In Chinese)
- [21] 建筑结构荷载规范: GB 5009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 30—63.
Load code for the design of building structures: GB 5009—2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012: 30—63. (In Chinese)
- [22] 张相庭. 工程结构风荷载理论和抗风计算手册 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1990: 26—30.
ZHANG X T. Wind pressure and calculation of wind-induced vibration [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990: 26—30. (In Chinese)
- [23] AN Y, QUAN Y, GU M. Field measurement of wind characteristics of typhoon Muifa on the shanghai world financial center [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, 8(9): 893739.
- [24] QUAN Y, WANG S, GU M, *et al.* Field measurement of wind speeds and wind-induced responses atop the shanghai world financial center under normal climate conditions [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013: 469—481.
- [25] 黄子逢, 顾明. 上海环球金融中心顶部台风“灿鸿”风速实测 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(8): 1205—1211.
HUANG Z F, GU M. Field measurement of wind characteristics of typhoon Chan-hom on Shanghai world financial center [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(8): 1205—1211. (In Chinese)
- [26] AIJ recommendations for loads on buildings: AIJ—2004 [S]. Tokyo: Architecture Institute of Japan, 2004: 614—618.
- [27] CAO S Y, TAMURA Y, KIKUCHI N, *et al.* Wind characteristics of a strong typhoon [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(1): 11—21.
- [28] LI L X, KAREEM A, XIAO Y Q, *et al.* A comparative study of field measurements of the turbulence characteristics of typhoon and hurricane winds [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 140(12): 49—66.