

引用格式 黄希桂,罗胜昌,李利孝. 基于实测数据的台风边界层风速剖面特征研究[J]. 工业建筑,2024,54(2):98-105. HUANG X G, LUO S C, LI L X. Research on Wind Speed Profile Characteristics of Typhoon Boundary Layer Based on Measured Data[J]. Industrial Construction,2024,54(2):98-105(in Chinese). DOI:10.3724/j.gjzG23121101

基于实测数据的台风边界层风速剖面特征研究*

黄希桂¹ 罗胜昌^{2,3} 李利孝^{2,3}

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东深圳 518055; 2. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 3. 深圳大学城市智慧交通与安全运维研究院, 广东深圳 518060)

摘 要 目前规范中对台风影响区建筑物的抗风设计采用类比非气旋风场的方式来进行,然而大量实测结果表明台风剖面与非气旋风场风剖面存在较大差异,风剖面的影响因素和变化规律目前仍不明确。为清晰地了解台风的剖面特征及其规律,基于多个台风的实测剖面数据,以下垫面类型、台风结构分区和风速大小三类控制指标对数据进行分类,对各个类别的风剖面数据进行对比分析。研究表明:台风剖面中的近地急流层与下垫面类型、台风结构分区和风速均有关,即 A、B 类场地、较大风速和台风后眼壁区更易出现近地急流层;台风风剖面的梯度风高度与下垫面类型和平均风速存在着一定关系,A、B 类场地的梯度风高度由台风中心向外呈增大趋势,C 类场地下方的梯度风高度从台风中心向外呈先减小后增大趋势。

关键词 台风;边界层;风剖面特征;低空急流;现场实测

Research on Wind Speed Profile Characteristics of Typhoon Boundary Layer Based on Measured Data

HUANG Xigui¹ LUO Shengchang^{2,3} LI Lixiao^{2,3}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin university of Technology, Shenzhen 518055, China;
2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
3. Institute of Urban Smart Transportation & Safety Maintenance, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The wind-resistant design of building structures in the typhoon affected area in the codes is carried out by analogy with the non-cyclonic wind field, however, many measured results show that there is a large difference between the typhoon wind profile and the profile of the non-cyclonic wind field, and the influencing factors and changing rules of the typhoon wind profile are still not clear at present. To clearly understand the profile characteristics of typhoons, many measured profile data of several typhoons were used for the analysis. The measured data were categorized by three factors, namely, the underlying surface categories, the typhoon structural partitions, and the wind speed, and the wind profile data of each category were comparatively analyzed, and the study showed that: the low-level jet phenomena in typhoon wind profiles was related to the underlying surface categories, the typhoon structural partitions, and the wind speed, the low-level jets were more likely to occur at exposure category A, B, larger wind speed, and in the back eyewall region in typhoon; there was a certain relationship between the gradient wind height of the typhoon wind profile and the type of underlying surface and average wind speed. The gradient wind height of exposure category A and B showed an increasing trend from the center of the typhoon outward, while the gradient wind height underground of exposure category C showed a decreasing and then increasing trend from the center of the typhoon outward.

Keywords: typhoon; boundary layer; wind profile characteristics; low-level jet; field measurement

* 国家自然科学基金(52178491);广东省自然科学基金(2021A1515011769);深圳市自然科学基金(JCYJ20210324093809023)。

第一作者:黄希桂,硕士,主要从事高层建筑抗风研究。

通信作者:李利孝,博士,主要从事结构风工程研究,lilixiao@szu.edu.cn。

收稿日期:2023-12-11

0 引言

热带气旋是世界上最具破坏性的自然灾害之一,每年造成巨大的人员伤亡和财产损失。据 EM-DAT 报道,每年由热带气旋造成的经济损失高达 260 亿美元左右。在中国东南沿海地区,台风每年登陆约 7 次,年均造成约 56 亿美元的经济损失^[1]。

边界层风速剖面表征了大气边界层风速随高度的变化规律,是各类工程结构进行抗风设计时最重要的输入参量。风速剖面通常受到下垫面粗糙度、大气层结稳定度以及风场结构特征等的影响,常用模型主要有对数律模型、指数律模型等。针对热带气旋风场的风速剖面变化规律,国内外学者开展了大量深入广泛的研究探索。Powell 等^[2]利用 GPS 投落送在多个飓风眼壁区测得的 331 条强风剖面数据,系统研究了飓风场风剖面特征,发现在近地 200 m 高度内,平均风速随高度呈对数律增长,约 500 m 高度风速达到最大。He 等^[3]利用香港三个海岸气象站的多普勒雷达风廓线仪和风速计的同步测量结果,研究了 5 000 m 高度以下在热带气旋不同位置、不同风速区间下的平均风剖面,发现低空急流风剖面主要发生在眼壁以及后外环流区,急流高度分布在 330~1 600 m 之间;随着风速增大,急流特征愈显著,急流高度不断减小,同时地形崎岖会引起急流高度提升。Li 等^[4]利用从观测塔和多普勒声雷达观测到的 3 个台风的数据,分析了台风不同位置、不同下垫面粗糙度以及不同风速区间内的平均风剖面特征,结果表明低空急流风剖面易发生在台风移动方向的右后方。

目前各国的结构荷载规范大多使用非气旋风

场的风剖面代替台风影响区的风剖面进行结构抗风设计,但根据某些台风登陆灾后调查显示,风灾导致的树木倒伏表现出显著的周期性^[5-6],这些现象可能归因于台风中出现的低空急流,这种低空急流可能会显著增大低层建筑物、输电线路结构和树木的风荷载,对台风影响区的结构设计有显著影响。已有研究表明,低空急流的形成机制有以下几种:1) 高空高动量空气通过对流下降的气流向下混合^[4]; 2) 径向输入高角动量空气; 3) 水平平流^[7]; 4) 地形效应^[8]; 5) 边界层滚动^[4]等。根据低空急流的形成机制可以得到低空急流的出现位置应在台风结构的左前方,且出现高度应为数百米;但 Li 等^[4]却在台风的后眼壁区域捕捉到大量低空急流风剖面,且急流高度大多在 100 m 以下。

综上所述,台风具有十分复杂且独特的风剖面特征,且已有研究发现台风场中存在一个近地急流层,但其具体形成机理目前尚无法验证。因此,基于大量实测台风实测数据,理清台风场风剖面形态,分析影响台风场风剖面的主要影响因素及其影响规律,是目前进行台风场剖面特征分析的一种可行方法。

1 数据来源与样本分类

1.1 观测台风及测点信息

本次研究中主要数据来源于表 1 中的 4 次台风的观测数据,还有部分数据来源于其他文献^[9-13]。

1.2 实测数据分类

由于台风场受各种环境能热因素的影响,同一台风过程内样本的特征存在着较大的差异。已有研究表明,台风的结构、下垫面粗糙度与风速大小都对

表 1 台风观测点和观测设备的详细信息

Table 1 Detailed information about the typhoon observation records and measurement points

台风名 (编号)	观测塔名	经纬度	测量仪器	测量高度/m	观测时间	离台风最近 距离/km
鸚鵡 (0812)	湛江沙角旋观测塔	22°08′28.6″N, 113°42′34.5″E	NRG #40 anemometer	10, 20, 40, 60	2008-08-22T02:00— 2008-08-23T07:00	56.0
	珠海情侣路	22°14′5.04″N, 113°35′3.48″E	Airda 3000Q wind profiler	50~3 450	2008-08-22T10:24— 2008-08-23T09:32	29.1
黑格比 (0814)	湛江沙角旋观测塔	21°15′13.5″N, 110°39′14.8″E	NRG #40 anemometer	10, 30, 50, 70	2008-09-24T00:00— 2008-09-25T24:00	6.7
	茂名峙仔岛海洋观测塔	21°27′3.12″N 111°22′28.02″E	NRG #40 anemometer	10, 20, 40, 60, 80, 100	2008-09-24T00:00— 2008-09-25T24:00	6.9
	湛江东海岛雷达观测站	21°00′00″N, 110°18′00″E	Airda 3000Q Wind profiler	50~3 450	2008-09-24T00:00— 2008-09-24T11:10	55.0
莫拉菲 (0906)	汕尾红海湾观测塔	22°44′10.41″N, 115°35′3.48″E	Airda 3000Q Wind profiler	50~3 450	2009-07-18T18:00— 2009-07-19T10:20	50.0
巨爵 (0915)	珠海高栏岛观测塔	21°54′30″N, 113°16′9.9″E	NRG #40 anemometer	10, 40, 60	2009-09-14T00:00— 2009-09-16T00:00	48.7
	阳江上洋镇雷达观测站	21°31′24.2″N, 111°33′17.3″E	Airda 3000Q Wind profiler	50~3 450	2009-09-14T18:47— 2009-09-15T14:22	73.0

平均风剖面的特征存在显著影响,因此,按照场地类别、风速等级、台风结构三类控制指标对实测台风样本进行分类,便于后续分析。

参照 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[14]中关于场地类别的划分标准,根据地面粗糙度长度 z_0 将实测样本的场地类别分为以下4类:A($z_0 \leq 0.01$)、B($0.01 < z_0 \leq 0.15$)、C($0.15 < z_0 \leq 0.7$)、D($z_0 > 0.7$)。

在划分风速时,一般采用 Beaufort 提出的风力等级划分方法对风速等级进行确定。自然界台风风速通常在8级以上,本文以实测样本平均风速大小为划分依据,以17.2 m/s(整体风速较小的数据组阈值降低到10.8 m/s)为最低标准,对实测风速样本根据平均风速划分为以下六类:I($15 < U \leq 20$)、II($20 < U \leq 25$)、III($25 < U \leq 30$)和IV($30 < U \leq 35$)。

在台风水平向空间结构上,依据 GB/T 36745—2018《台风涡旋风数据判别规范》^[15],基于台风水平结构特征对每个台风过程选取了前外环流区(FOV)、前眼壁区(FEW)、风眼区(WE)、后眼壁区(BEW)和后外环流区(BOV)5个代表性区域进行分析。

2 近地层 100 m 以下台风风剖面研究

为了更好地从多个不同的实测台风剖面数据中研究其规律,需要对所有数据进行归一化。具体方式如下:以10 m高度风速 U_{10} 为基准,将各实测台风剖面除以 U_{10} 进行归一化。根据归一化风剖面数据,按照场地类别的不同进行分析。

2.1 A类场地

图1所示为A类场地下各台风结构部位以 U_{10}

进行归一化处理的风剖面,其中星号线为所有实测的归一化风速,粗实线代表归一化后的平均风速,粗虚线代表根据归一化平均风剖面拟合得到的指数律剖面。可见,台风在不同结构部位的风剖面有着较大的差异,在台风前外围区域,平均风剖面大致上符合指数律剖面;在台风前眼壁区的低风速区间内,平均风剖面大致上也较为符合指数律模型,但随着 U_{10} 的增大,40 m和60 m高度处的归一化风速逐渐接近并相等,不再符合指数律模型;在台风的风眼区域,由于其强变异性,风眼区的平均剖面线趋势较为曲折,难以通过指数律描述,且归一化风速随高度的变化不明显;在台风后眼壁区,不同风速等级下的归一化风剖面均在约40 m高度处出现了急流层,即在近地层40 m高度以下;随着高度的增加,归一化平均风速呈现不断增加的趋势,40 m处的风速达到最大值,随后40~60 m,归一化平均风速则随高度增加呈现减小的趋势,其平均风剖面并不符合传统的指数律剖面,且随着 U_{10} 的增大,急流层的现象越发明显;而在台风后外围区,同样也出现了近地急流层的现象,但相较于后眼壁区,急流层的现象有所减缓。

表2给出了A类场地下采用最小二乘法拟合的指数律剖面指数 α 的值,从各工况拟合所得指数 α 的值来看,后外围>后眼壁>前外围>前眼壁>风眼,即台风风眼经过后, α 值整体有所增大;在前后眼壁区工况下, α 值均随着 U_{10} 的增大而减小,由于眼壁区的风速一般大于外围区,即由台风内径向外,指数 α 呈现出一直增大的趋势,但各台风结构部位拟合所得指数 α 值均小于GB 50009—2012描述的海面类别场地的推荐值(0.12)。

表 2 A类场地实测台风风场近地层风剖面指数律模型拟合参数 α

Table 2 The fitted parameter α of the fitting mean wind profile with the power-law model in exposure category A

A-FOV	A-FEW-II	A-FEW-III	A-FEW-IV	A-WE	A-BEW-IV	A-BEW-III	A-BEW-II	A-BOV
0.038 9	0.035 3	0.036 9	0.020 9	0.022 6	0.022 4	0.083 4	0.074 9	0.083 4

通过对A类场地实测台风场不同结构部位下的近地层风速剖面研究发现,由于急流层的存在,实测风剖面与指数律剖面有着较大差异;后眼壁高风速处出现急流层的概率会更大,这与Li等^[4]所提到的一致,即在台风的前侧结构,上升气流显著,而在后眼壁区域则以下降气流为主,近地层气流的向下输送将100 m左右的强风带到40 m左右的高度,增强了地面风,形成了急流层。同时,风速越高,低空急流现象越明显,Holthuijsen等^[16]认为高风速条件下会导致海面波浪的连续破碎,形成具有非常光滑粗糙度的厚泡沫喷雾层,降低了飓风阻力系数 C_d ,从而更有可能产生低空急流。

2.2 B、C、D类场地

图2所示为B、C、D类场地下各台风结构部位的归一化风剖面,其中B类眼壁区分了两个风速等级工况。可见:与A类场地类似的是,B类场地外围区的平均风剖面较为符合指数律剖面,而眼壁区的风剖面则出现了低空急流层的现象;C、D类场地各台风结构部位的风剖面都较为符合指数律剖面,基本没出现急流现象。这表明了急流层的产生可能与下垫面类型有关,A类和B类场地下更容易出现急流层现象,这与Owinoh^[17]认为的在陆海过渡地区更可能产生急流层的现象一致,当台风在海洋上移动时,热流的空间变化会改变局

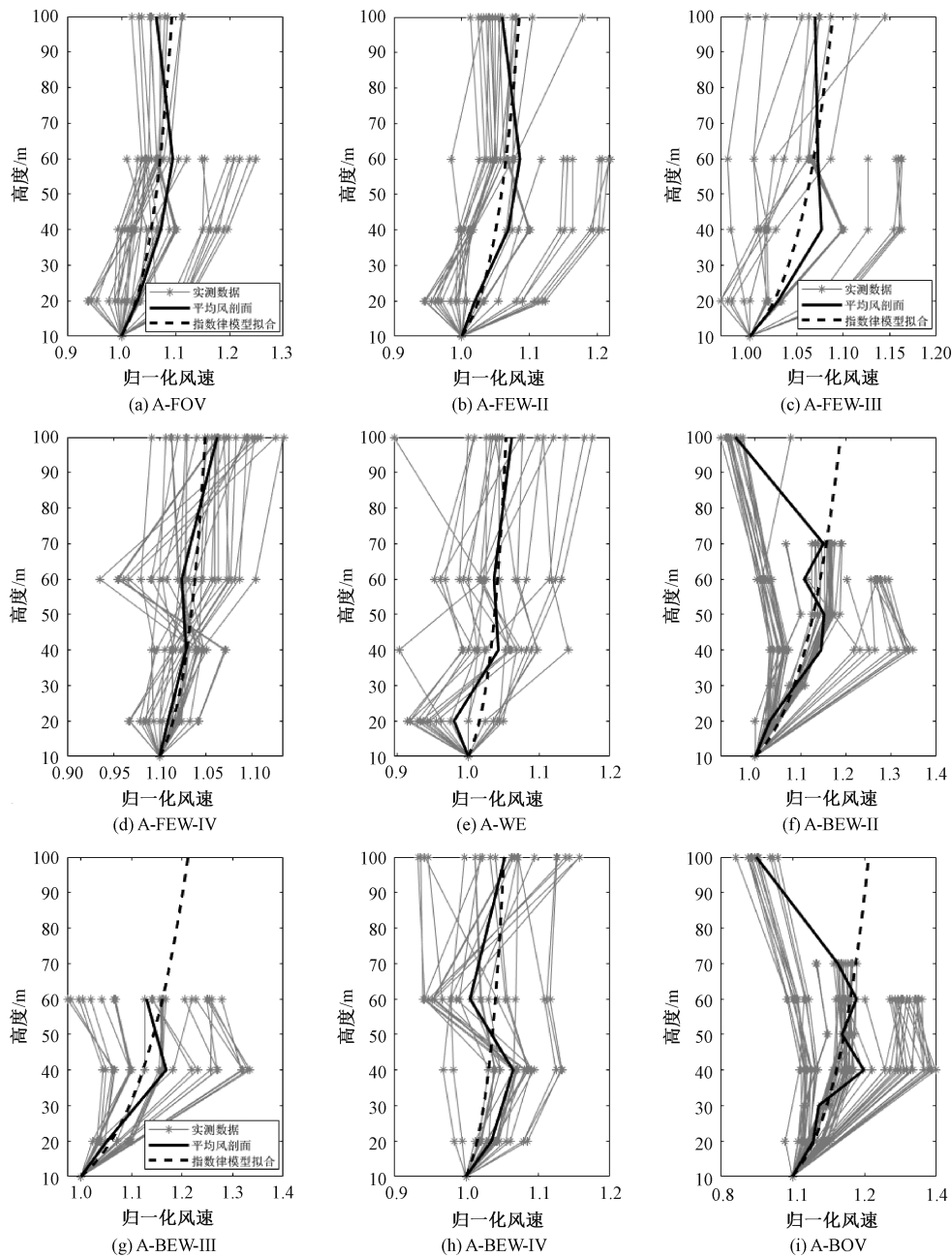


图 1 A 类场地不同台风结构部位归一化剖面

Fig. 1 Normalized wind profiles of different typhoon structural partitions under exposure category A

部的稳定性,并影响湍流结构,影响因素包括对流湍流和气流中的平均动量,这也促成了陆海过渡地区近地急流层的形成。

表 3 为 B、C、D 类场地风剖面拟合指数 α 值。可见:外围区和眼壁区的指数 α 均小于我国 GB 50009—2012 规定的 B、C、D 类场地对应推荐值 0.16、0.22、0.30,而风眼区的指数 α 大于推荐值,呈现出随着平均风速的增大而减小的趋势,其原因可能是由于黏性效应^[18]和湍流耗散率^[19]等因素。

通过对各类场地实测台风场不同结构部位下的近地层风速剖面研究发现:不同场地类别的指数 α 均随风速增加呈现出减小的趋势;A 类场地的台风

表 3 B、C、D 类场地实测台风风场近地层风剖面指数律模型拟合参数 α

Table 3 The fitted parameter α of the fitting mean wind profile with the power-law model in exposure categories B, C and D							
B-OV	B-EW-II	B-EW-III	B-WE	C-OV	C-EW	D-OV	D-EW
0.154 1	0.159 3	0.123 3	0.167 4	0.208 4	0.164 0	0.279 5	0.223 2

后眼壁区域的高风速区间内更容易发生低空急流现象。

产生低空急流的主要原因还包括以下几点: 1) 低空急流是由于强风与较弱的气流交替所产生的,在高空处的大风气流滚动下被输送到表面,在地面附近由于摩擦和湍流阻力而被减速的气流则

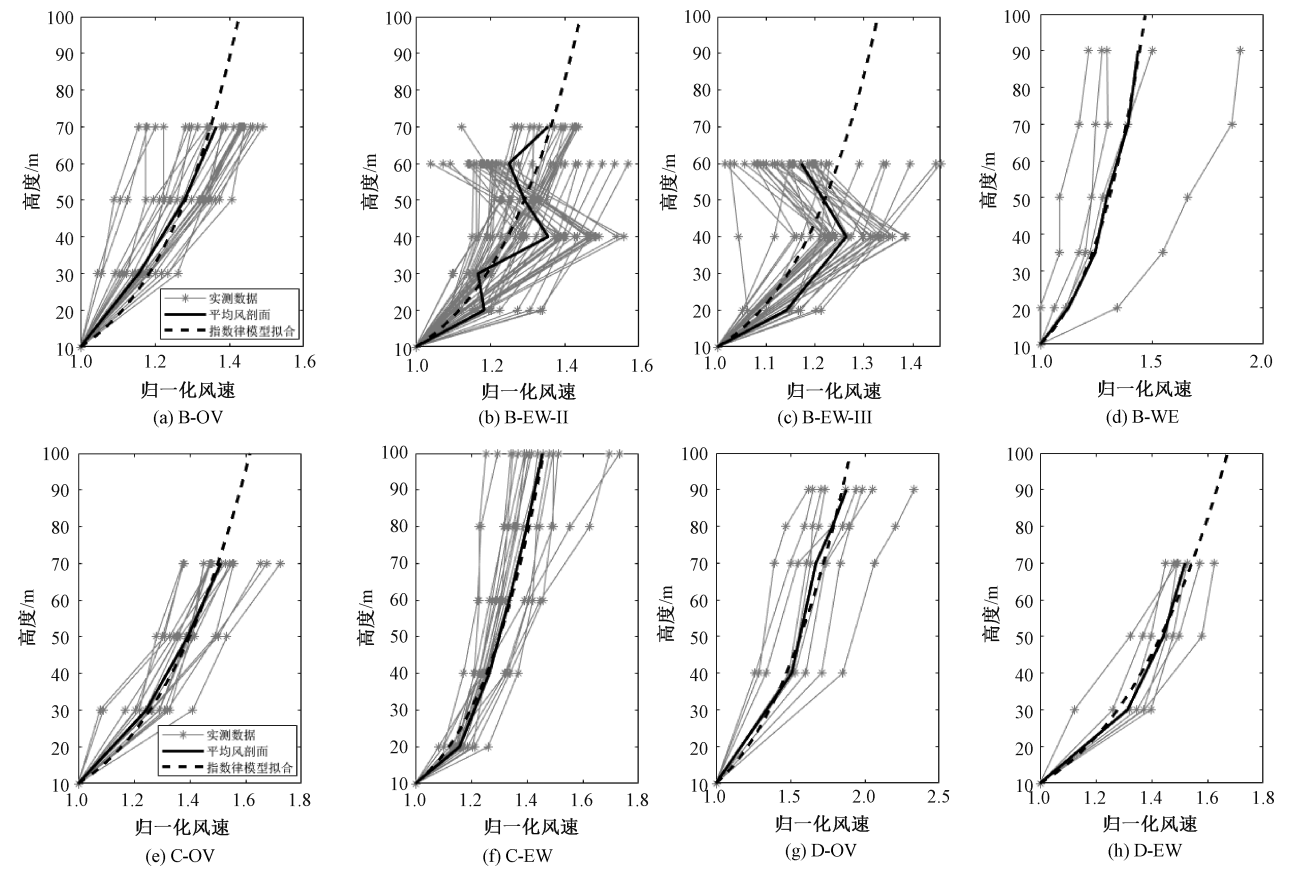


图 2 B、C、D 类场地不同台风结构部位归一化风剖面
Fig. 2 Normalized wind profiles of different typhoon structural partitions under exposure category B, C and D

在向上输送,因此在近地处出现了较大风速,而高空位置由于其气流来自地面附近,则风速有所下降^[6]。

2)绝对角动量强烈的向内平流是产生近地急流的必要条件,并且给出了急流高度的预测值公式:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2K}{I}} \tag{1}$$

式中: K 为动量的湍流扩散率; I 为惯性稳定矩^[20-21]。

3)没有热对比的强水平切变可能有助于在快速移动的台风附近产生非对称的低空急流,即急流很可能是由低空冷空气的输入导致^[7,22]。

3 大气边界层 1 000 m 以下台风剖面研究

上节对近地层 100 m 高度以下范围内的风剖面进行了研究,一般来说,成熟的台风主要由 4 个区域组成,即边界层、边界层以上没有径向运动的区域、上升气流区和静止眼区域^[23]。对于工程领域来说,最重要的区域是边界层部分,在这个区域内动力学和热力学通常是独立的或弱耦合的^[24]。本节利用边界层 1 000 m 高度以下多个台风的观测数据,同样将台风数据分为场地类别、结构分区以及风速等

级三种不同的工况,对比分析了不同场地类别下台风各结构部位风剖面的变化规律。

3.1 A 类场地

图 3 所示为 A 类场地下台风各结构部位 1 000 m 高度以下风剖面,图中星号代表实测风速,粗实线代表平均风速,纵轴为高度,采用对数坐标,横轴为风速大小。可以看出,A 类场地前外围区的平均风速随高度增加而增加,在 1 000 m 以下未出现最大风高度;前眼壁区 3 个风速等级对应的梯度风高度分别为 300,400,550 m,即梯度风高度有随风速增加而增加的趋势,另外,当 10 m 处的平均风速 U_{10} 在 20~25 m/s 区间内时,平均风剖面有呈现反“C”型的特征,而当 U_{10} 位于 25~30 m/s 区间或大于 30 m/s 时,平均风速从梯度风高度到 1 000 m 高度范围内相差不大;对于风眼区,对应的梯度风高度约为 250 m,风速剖面也开始呈现反“C”型特征;与前眼壁区相同,后眼壁区三个风速等级对应的最大风高度同样也为 300,400,550 m,也有随风速增加而增加的趋势,其三个风速等级的平均风剖面均有反“C”型的特征;在台风的后外围区,最大风高度约为 750 m,在此高度以上部分的风速大致上保持不变。

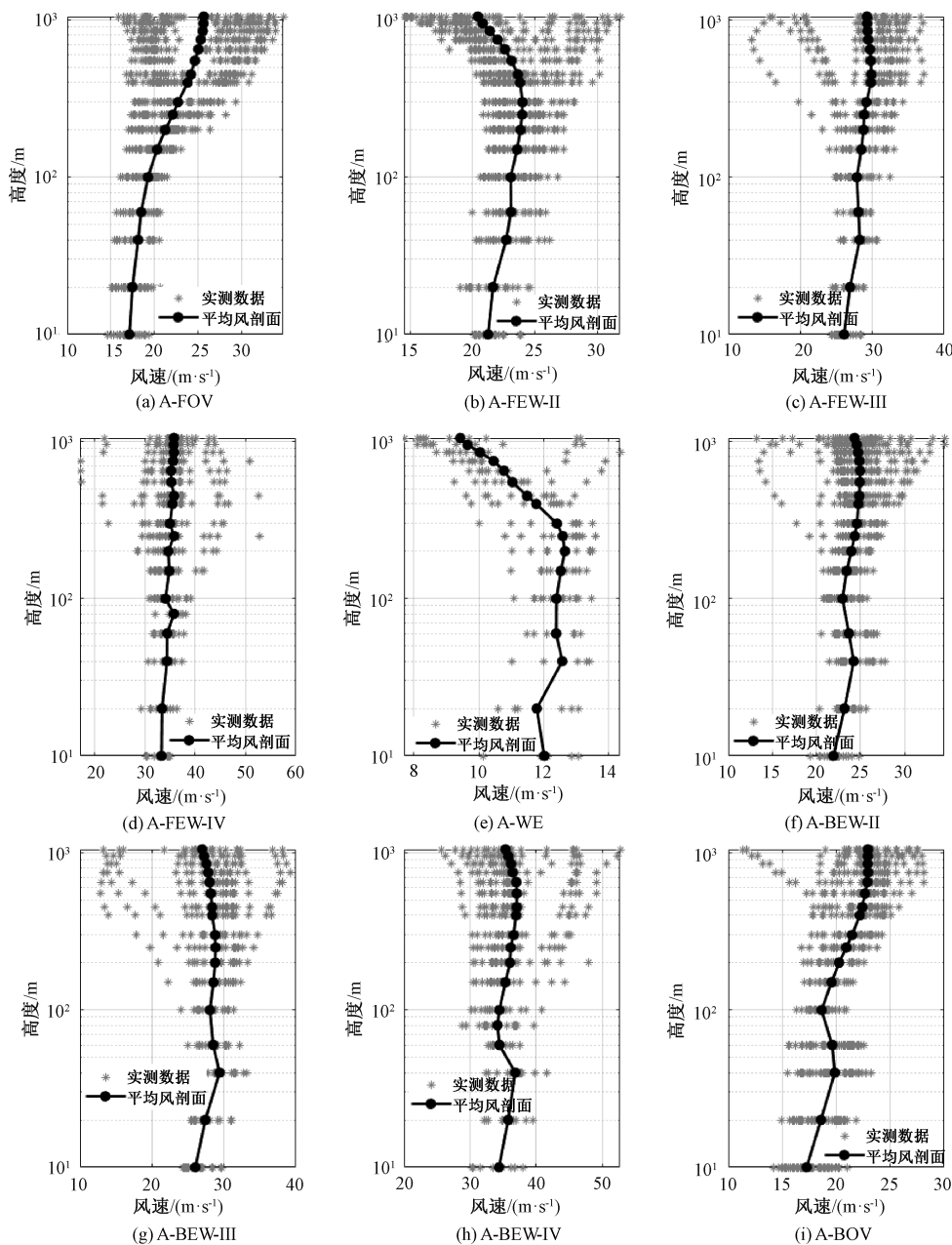


图 3 A 类场地不同台风结构部位平均风剖面

Fig. 3 Average wind profiles of different typhoon structural partitions under exposure category A

综上所述,A 类场地的梯度风高度 GB 50009—2012 建议值取为 300 m,只适用于台风眼壁区风速为 20~25 m/s 的情况。另外,最大风速高度呈现出沿台风半径向外逐渐增大的变化趋势。

3.2 B、C 类场地

图 4 展示了在 B、C 类场地下各台风结构部位的平均风剖面。可以看出:B 类场地和 C 类场地外围区的平均风速均随高度增加而增加,其中 C 类场地在约 900 m 高度处达到最大风速高度;B 类场地眼壁区对应的最大风高度约为 550 m,C 类场地眼壁区对应的最大风高度约为 650 m,随后平均风速剖面均开始呈现反“C”型特征的现象;B 类场地风眼

区对应的最大风高度约为 400 m,之后风速剖面开始呈现反“C”型特征,而 C 类场地风眼区的风速剖面随高度增加而增加,在 1 000 m 以下未出现最大风高度;B、C 类场地下各台风结构部位的最大风速高度皆不符合 GB 50009—2012 中所对应的梯度风高度 350 m 和 400 m;B 类场地与 A 类场地相似,最大风高度由台风中心向外呈现出一直增大的变化趋势,而 C 类场地这一趋势不明显。

通过对各类场地实测台风场不同结构部位 1 000 m 以下的风速剖面研究发现,台风风场各类场地下外围区的最大风速高度都要高于眼壁区,这与 Franklin 等^[25]得出的结论相同;A、B 类场地的

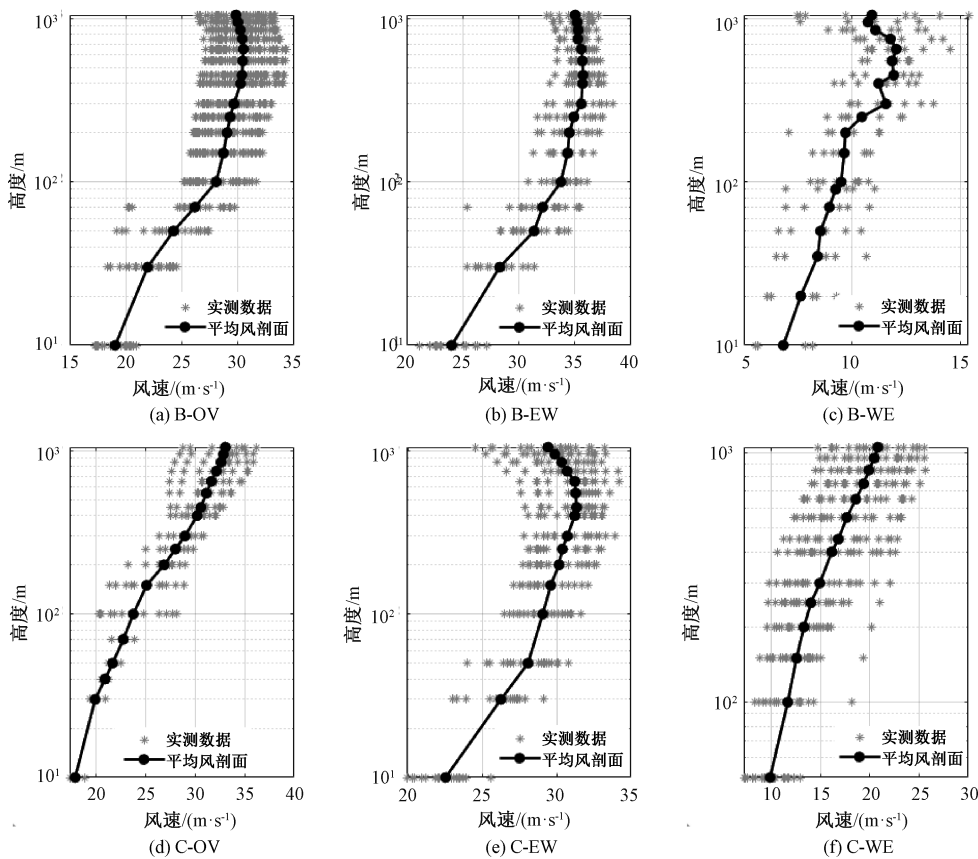


图 4 B、C 类场地不同台风结构部位平均风剖面

Fig. 4 Average wind profiles of different typhoon structural partitions under exposure category B and C

最大风速高度沿台风中心向外均逐渐增大,这与 Keprt^[20-21]所认为的一致,但在 C 类场地下这一趋势并不明显;达到梯度风高度后,风速剖面呈现出反“C”型特征。

4 结 论

为探究台风条件下粗糙度类别、台风的地理位置以及风速等因素对 1 000 m 以下边界层风剖面的影响情况,基于多个登陆台风的观测数据,对粗糙度类别、台风结构以及风速区间的不同工况研究了风剖面的异同,并对出现的低空急流风剖面的形成机制进行了解释。

1) 超低空急流的产生与下垫面类型、所处台风结构分区和风速大小有关。台风登陆时,出现近地急流的可能较大,随着台风的登陆,近地急流现象逐渐消失,即位于海陆过渡区域出现急流层的概率更大;从台风的结构来看,后侧眼壁区域更容易出现近地急流,并且随着风速的增加,出现急流层的可能性也越大。

2) 大部分场地类别和结构分区下,实测台风平均风剖面的指数率模型拟合系数小于我国 GB 50009—2012 规定的风剖面指数参数 α 值,仅 B 类

场地台风风眼区平均风剖面的指数率模型拟合系数与 GB 50009—2012 的规定值基本一致。

3) 台风风剖面的梯度风高度与场地类别和平均风速的大小存在着一定的关系。主要体现为 A、B 类场地的梯度风高度由台风中心向外呈现出一直增大的变化趋势,而 C 类场地下下的梯度风高度由台风中心向外呈现出减小—增大的变化趋势,即梯度风高度随着平均风速的增大而减小。

参 考 文 献

[1] ELLIOTT R J R, STROBL E, SUN P. The local impact of typhoons on economic activity in China: A view from outer space [J]. Journal of Urban Economics, 2015, 88(7): 50-66.

[2] POWELL M D, VICKERY P J, REINHOLD T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones [J]. Nature, 2003, 422: 279-283.

[3] HE Y, CHAN P, LI Q. Observational study on thermodynamic and kinematic structures of Typhoon Vicente (2012) at landfall [J]. Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 2018, 172:280-297.

[4] LI L X, KAREEM A, HUNT J, et al. Observed sub-hectometer-scale low level jets in surface-layer velocity profiles of landfalling typhoons [J]. Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 2019, 190:151-165.

[5] FUJITA T T. Damage survey of hurricane andrew in south Florida

- [J]. Storm Data, 1992, 34(8): 25–39.
- [6] WURMAN J, WINSLOW J. Intense sub-kilometer-scale boundary layer rolls observed in Hurricane Fran [J]. Science, 1998, 280 (5363): 555–557.
- [7] KITABATAKE N, TANAKA Y. Observed low level jets associated with Typhoon Higos (0221) over the Kanto Plain [J]. Sola, 2009(5): 105–108.
- [8] NGO T T, LETCHFORD C W. Experimental study of topographic effects on gust wind speed [J]. Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 2009, 97(9/10): 426–438.
- [9] TSE K T, LI S W, CHAN P, et al. Wind profile observations in tropical cyclone events using wind-profilers and doppler SODARs [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 115: 93–103.
- [10] TSE K T, LI S, FUNG J C H. A comparative study of typhoon wind profiles derived from field measurements, meso-scale numerical simulations, and wind tunnel physical modeling [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 131: 46–58.
- [11] HE Y, CHAN P, LI Q. Observations of vertical wind profiles of tropical cyclones at coastal areas [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 152: 1–14.
- [12] SONG L, CHEN W, WANG B, et al. Characteristics of wind profiles in the landfalling typhoon boundary layer [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 149: 77–88.
- [13] HE J, HON K, LI Q, et al. Wind profile analysis for selected tropical cyclones over the South China Sea based on dropsonde measurements [J]. Atmósfera, 2022, 35(1): 111–126.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 台风涡旋风数据判别规范: GB/T 36745—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [16] HOLTHUIJSEN L H, POWELL M D, PIETRZAK J D. Wind and waves in extreme hurricanes [J/OL]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C9). [2012–09–01] <https://doi.org/10.1029/2012JC007983>.
- [17] OWINOH A Z, HUNT J C, ORR A, et al. Effects of changing surface heat flux on atmospheric boundary-layer flow over flat terrain [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 116(2): 331–361.
- [18] MAHRT L, VICKERS D, SUN J L, et al. Determination of the surface drag coefficient [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99(2): 249–276.
- [19] ZHU P, FURST J. On the parameterization of surface momentum transport via drag coefficient in low-wind conditions [J]. Geophys Res Lett, 2013, 40(11): 2824–2828.
- [20] KEPERT J. The dynamics of boundary layer jets within the tropical cyclone core. Part I: Linear theory [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2001, 58(17): 2469–2484.
- [21] KEPERT J, WANG Y. The dynamics of boundary layer jets within the tropical cyclone core. Part II: Nonlinear enhancement [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2001, 58(17): 2485–2501.
- [22] MASHIKO W. Formation mechanism of a low-level jet during the passage of Typhoon Ma-on (2004) over the southern Kanto district [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II, 2008, 86(1): 183–202.
- [23] CARRIER G, HAMMOND A, GEORGE O. A model of the mature hurricane [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 47(1): 145–170.
- [24] SNAIKI R, WU T. A linear height-resolving wind field model for tropical cyclone boundary layer [J]. Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 2017, 171: 248–260.
- [25] FRANKLIN J L, BLACK M L, VALDE K. Eyewall wind profiles in hurricanes determined by GPS dropwindsondes; proceedings of the Preprints[C]//24th Conf on Hurricanes and Tropical Meteorology. Fort Lauderdale; the Units States of America, 2000.