

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20240712003

文章编号:1674-599X(2024)06-0093-09

引用格式:吴向阳,官华,徐祖恩,等.典型工程场地台风剖面及台风作用下结构气动阻尼研究[J].交通科学与工程,2024,40(6):93-101.

Citation: WU Xiangyang, GUAN Hua, XU Zuen, et al. Typhoon wind profile and structural aerodynamic damping under action of typhoon at typical engineering sites[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(6): 93-101.

# 典型工程场地台风剖面及台风作用下结构气动阻尼研究

吴向阳<sup>1,2</sup>, 官华<sup>2</sup>, 徐祖恩<sup>1</sup>, 王诗涵<sup>3</sup>, 崔巍<sup>3,4</sup>, 赵林<sup>3,4</sup>

(1. 浙江金华甬金高速公路有限公司 杭州科技分公司, 浙江 杭州 310000; 2. 浙江舟山跨海大桥有限公司, 浙江 舟山 316000; 3. 同济大学 土木工程防灾减灾国家重点实验室, 上海 200092; 4. 同济大学桥梁结构抗风技术交通行业重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 台风是影响我国沿海地区大跨度、高耸结构安全的关键荷载, 台风风剖面与常规良态风风剖面存在显著差异, 准确评估台风设计风剖面对于指导沿海结构的抗风设计具有至关重要的意义。基于此, 选取了国内外8种主要的规范和标准设计开阔地貌的风剖面, 并将其与实测台风风剖面进行对比, 发现现行规范在描述台风风剖面时, 难以充分反映其随高度和空间位置的变化特征。针对这一不足, 提出了三种台风设计风剖面的方法, 分别是: 1. 基于规范建议设计风剖面; 2. 设计不同高度相同重现期的组合风剖面; 3. 设计基于特定高度及重现期的真实风剖面, 其中方法2和方法3考虑了台风剖面随高度的变化特征。研究表明, 方法2和方法3所得的风剖面均大于规范风剖面, 方法2获得的风剖面与方法3的平均风剖面较为接近, 但方法2获得的风剖面在真实台风中可能并不存在, 且方法3有接近一半的真实风剖面高于方法2的结果。进一步分析表明, 现行规范中推荐的风剖面可能低估了台风实际风剖面的强度。同时, 仅基于不同高度处100年重现期的风剖面也无法全面地反映台风的真实风剖面特性。因此, 在考虑风对建筑物的静力响应时, 建议采用方法3所得的风剖面作为台风设计风剖面, 以确保结构的安全性和可靠性。

**关键词:** 台风剖面; 设计风剖面; Monte Carlo随机模拟; 结构气动阻尼

中图分类号: P425、U447

文献标志码: A

## Typhoon wind profile and structural aerodynamic damping under action of typhoon at typical engineering sites

WU Xiangyang<sup>1,2</sup>, GUAN Hua<sup>2</sup>, XU Zuen<sup>1</sup>, WANG Shihan<sup>3</sup>, CUI Wei<sup>3,4</sup>, ZHAO Lin<sup>3,4</sup>

(1. Hangzhou Technology Branch, Zhejiang Jinhua Yongjin Expressway Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. Zhejiang Zhoushan Cross-sea Bridge Co., Ltd., Zhoushan 316000, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Key Laboratory of Transport Industry of Wind Resistant Technology for Bridge Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Typhoon is a key load influencing the safety of large-span and tall structures in the coastal areas of China. There is a great difference between typhoon wind profile and normal wind profile. Accurate estimation of design wind profile of a typhoon is very important to guide the wind resistance design of coastal structures. In this paper, the wind profiles of 8 major standards and specifications on open landforms at home and abroad are selected to compare with the measured typhoon profiles. The current specifications are difficult to reflect the variation characteristics of typhoon profiles with height

收稿日期: 2024-07-12

基金项目: 舟山连岛西堠门跨海大桥风环境与结构风效应预警与防控研究(202208)

通信作者: 崔巍(1988—), 男, 助理教授, 主要从事结构风工程方面的研究工作。E-mail: cuiwei@tongji.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

and do not include the evolution of typhoon profiles with spatial location. In response to this, the paper proposes three methods for design wind profile of typhoons; 1. design of wind profile based on the specification; 2. design of combined wind profile based on the same recurrence period at different heights; 3. design of the real wind profile based on the wind speed in the recurrence period at specific heights. Method 2 and 3 consider the characteristics of the typhoon wind profile changing with height. The calculated results show that the wind profiles obtained by method 2 and 3 are greater than the standard profile, and the profile obtained by method 2 is close to the mean profile obtained by method 3, but the profile obtained by method 2 may not exist in real typhoons. Nearly half of the real wind profile obtained by method 3 is higher than the result of method 2. The wind profile recommended in the current specification may be the result of underestimating the strength of actual wind profile of typhoons, and the wind profile based on the 100-year recurrence period at different heights cannot comprehensively reflect the real profile characteristics of typhoons. If only the static response of wind to buildings is considered, it is recommended to adopt the design wind profile of typhoons based on method 3 to ensure safety and reliability of structures.

**Key words:** typhoon wind profile; design wind profile; Monte Carlo random simulation; structural aerodynamic damping

如今,超高层建筑的高度已突破800 m,远超大气边界层的高度,因此超高层建筑上部可能会受到热带气旋等大尺度、高风速风暴的影响。由于台风频发,台风已成为我国沿海地区影响大跨度和高耸结构安全的关键荷载。大量实测数据表明,台风风剖面与常规良态风剖面存在较大差异。SIMIU等<sup>[1]</sup>、FRANKLIN等<sup>[2]</sup>和POWELL等<sup>[3]</sup>的研究均表明:台风平均风剖面更适合用对数律来描述,梯度风高度为400~600 m。CHOI<sup>[4]</sup>、ISHIZAKI<sup>[5]</sup>、AMANO等<sup>[6]</sup>和HOLMES<sup>[7]</sup>通过实测得到了台风近地风剖面与幂函数律拟合较好的结论,CHOI的研究结果表明梯度风边界层高达1 460 m;ISHIZAKI和AMANO等认为梯度风高度为100 m,并提出了梯度风高度100 m以下的台风平均风剖面模型。GIANG等<sup>[8]</sup>、李利孝等<sup>[9]</sup>和王旭等<sup>[10]</sup>进一步指出,在40~70 m高度以下,无论用幂指数律还是对数律拟合风剖面,所得结果差异都较小,且与实测结果高度吻合。王旭等<sup>[10]</sup>基于台风“梅花”影响下10、20、30、40 m高度处的上海浦东地区近地风现场实测数据,研究了平均风速、湍流度和阵风因子随高度的变化规律。SONG等<sup>[11]</sup>基于实测数据和WRF-ARW模式数值模拟结果,发现台风风眼眼壁区存在一种较强的,且为垂直切变的“S”形风剖面。赵林等<sup>[12]</sup>结合移动追风设备跟踪了强台风“山竹”近地面1 400 m范围内风剖面的变化,证实了这一观点。GIAMMANCO等<sup>[13]</sup>采用下投式探空仪数据和基于

速度方位显示技术分析得到的雷达数据,研究了台风风速剖面的变化特点,发现台风竖向剖面最大风速的高度随台风中心到台风眼眼壁半径的增大而增大。典型台风竖向风速剖面在不同半径位置的分布特征如图1所示。由图1可知,在靠近风眼眼壁区,台风风速最大时其高度约为300~500 m;而在台风外围,这一高度可能超过1 000 m。

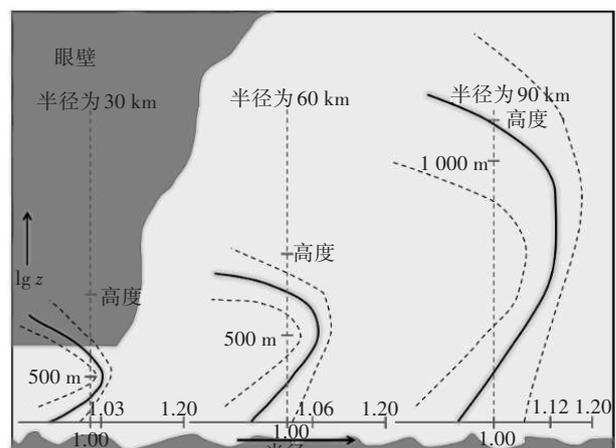


图1 典型台风竖向风速剖面分布特征

Fig. 1 Vertical wind velocity profile distribution characteristics of typical typhoons

为便于工程实践,良态风剖面通常被简化为风速切变模型,目前广泛采用对数剖面或指数剖面模型来描述。这些模型将风剖面定义为与地表粗糙长度有关的函数,并引入了一个关键参数:梯度风高度。当垂直高度大于梯度风高度时,水平风速将

保持恒定,梯度风高度可能因地表粗糙度的改变而变化,但一般为300~550 m。虽然指数剖面近似法简便易用,但它缺乏理论基础。在我国东南沿海区域,设计风速的确定主要依赖于长期实测风速的极值分布。这些区域的气象站通常拥有近30~40年的风速数据,其中既包含了台风风速,也涵盖了非台风风速。虽然台风风速样本数量较少,但台风风速样本的数值较大。然而,现行规范将台风和非台风统一处理,采用阶段极值采样和风速样本的概率分布函数预测重现期的极值风速。这种方法可能导致计算出的极值风速比实际极值风速低,从而使设计风速的预测产生较大偏差。且由于台风剖面的形状不仅受地表粗糙长度的影响,还依赖于其内部环流的位置以及超梯度风等复杂现象<sup>[14]</sup>,直接应用现有规范来指导我国沿海地区台风风剖面的设计,所得到的设计风剖面可能会与实际台风风剖面存在显著差异。因此,合理估计台风设计风剖面对指导沿海地区结构抗风设计至关重要。

基于下投式探空仪实测的台风剖面及国内外8种主要规范、标准设计的开阔地貌的风剖面包括美国ASCE 2010、澳洲/新西兰AS/NZ 2011、日本AIJ 2004、中国CNS 2012、欧洲Eurocode 2010、国际标准ISO 2009、印度IWC 2012<sup>[13]</sup>,如图2所示(图中 $Z$ 为高度, $V$ 为风速)。由图2可以看出,归一化规范风剖面大于实测风剖面(GIAMMANCO等<sup>[13]</sup>、POWELL等<sup>[15]</sup>、Eye wall、Outer vortex<sup>[16]</sup>风剖面),但实测风剖面的最大风速所在高度(可视为梯度高度)却显著高于规范中的建议值,且实测结果多取自海平面,其10 m高度处风速( $V_{10}$ )可能显著高于规范中平坦地貌的风速,这表明真实的台风风速剖面实际上要高于现行规范所给出的估计值。若采用幂指数律对实测数据进行拟合,得出边界层台风剖面幂指数 $\alpha=0.078$ ,这与DAVENPORT提出的当地表粗糙长度为 $z_0=0.0002$  m时,幂指数为1/12.9的结论基本一致,但其建议的梯度高度仅为155 m,与台风剖面形状不符。可见,现行规范无法准确地描述台风剖面随高度的变化特征,也无法再现台风超梯度风现象(剖面存在最大风速高度,该高度以上风速会逐渐下降)。同时,规范未涵盖台风剖面随空间位置的演变过程,尽管国际标准ISO 2009指出了需要考虑良态风、热带气旋和下击暴流这三种风剖面,但其仅提供了良态风剖面的计算方法,对于热带气旋和下击暴流的风剖面则未给出具体的解决方案。

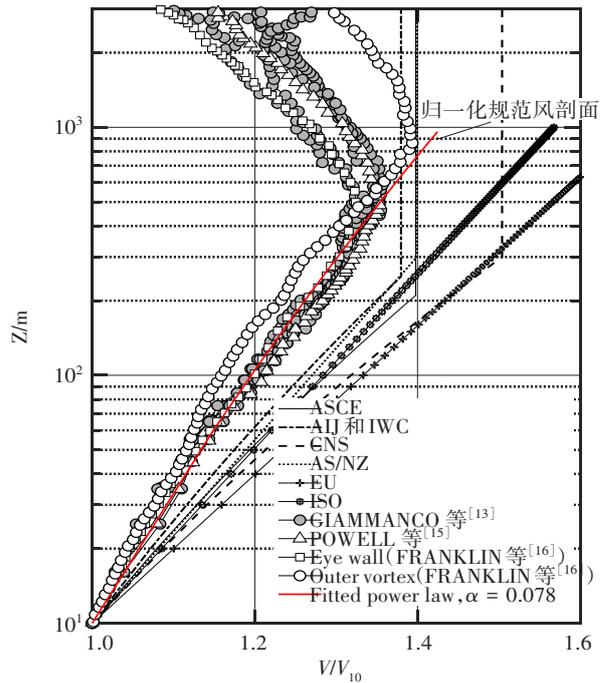


图2 台风实测及规范风剖面

Fig. 2 Measured typhoon wind profile and typhoon wind profile based on specification

## 1 台风边界层三维风场模型

2018年FANG等<sup>[17]</sup>在MENG三维风场模型的基础上进行了改进,不仅引入了三维气压场以体现压力随高度的变化关系,还整合了三维温度场以及随高度变化的黏性系数,从而得到了一个更为精确和全面的解析模型:

$$p(r, z^*) = \left\{ p_{c,0} + \Delta p_0 \exp \left[ - \left( R_{max}/r \right)^B \right] \right\} \left( 1 - \frac{g\kappa z^*}{R_d \theta_v} \right) \quad (1)$$

式中: $p(r, z^*)$ 为台风中心半径 $r$ 高度 $z^*$ 处的气压; $p_{c,0}$ 为海平面的热带气旋中心气压; $\Delta p_0$ 为海平面的热带气旋中心压差(热带气旋中心气压和中心压差可以根据中国气象局等的观测记录给出); $B$ 为Holland径向气压剖面无量纲参数; $z^*$ 为海拔高度; $g$ 为重力加速度; $R_d$ 为干空气常数; $\theta_v$ 为潜热; $R_{max}$ 为最大风速半径; $\kappa$ 为Von Karman常数。

$$\theta_v = (1 + 0.61q)(T_s + \tau z^*) + \frac{\kappa g}{R_d} z^* \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{2(1 + 0.608q)}{7(1 + 0.86q)} \quad (3)$$

$$q = H_R \times \frac{3.802}{100p_z} e^{17.677/(T + 243.5)} \quad (4)$$

$$T_s = 301.15 - 3(\psi - 10)/20 \quad (5)$$

式中: $\psi$ 为纬度; $T_s$ 为海表面温度; $H_R$ 为相对湿度,取

90%;  $T$  为高度  $z^*$  处的温度;  $q$  为高度  $z^*$  处的湿度;  $\tau$  为温度沿高度的递减率;  $R$  为湿空气常数;  $P_z$  为离地或离海平面高度  $z$  处的气压。

关于模型中的 Holland 系数  $B$ , FANG 等<sup>[17]</sup> 结合实测数据给出了相应的经验公式:

$$B = 4.1025 \times 10^{-5} \times (\Delta p_0)^2 + 0.0293 \times \Delta p_0 + 0.7959 \times \ln(R_{\max}) - 4.601 + \varepsilon \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon$  为标准差项;  $R_{\max}$  为最大风速半径, 其统计模型由 2013 年 FANG 等<sup>[17]</sup> 的研究给出, 表达式如下:

$$\ln R_{\max} = -38.36 \Delta p_0^{0.025} + 46.75 + \varepsilon \quad (7)$$

梯度高度处的切向风速计算公式如下:

$$v_{\theta g} = \frac{1}{2}(c_\theta - fr) + \sqrt{\left(\frac{c_\theta - fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}} \quad (8)$$

式中:  $v_{\theta g}$  为梯度高度处的切向风速;  $f$  为科里奥力;  $\rho$  为空气密度;  $\frac{\partial p}{\partial r}$  为径向气压梯度;  $r$  为半径;  $c_\theta$  为热带气旋的移动速度在  $\theta$  方位处的分量, 由下式得出:

$$c_\theta = -c \sin(\theta - \beta) \quad (9)$$

式中:  $\beta$  为热带气旋的移动方向;  $c$  为热带气旋的移动速度。

计算得到梯度高度处的切向风速  $v_{\theta g}$ 、切向折减速度  $v'_\theta$  和径向折减速度  $v'_r$  后, 即可重建热带气旋的风场。

本文分别对 2008 年 Hagupit、2013 年 Haiyan 和 2014 年 Rammasun 三次台风某一时刻的风速场进行重构。台风 Hagupit 正东方向的竖向风速剖面如图 3 所示。由图 3 可知, 最大风速位于最大风速半径、高度 200 ~ 800 m 处, 而靠近台风风眼的区域风速则逐渐衰减至接近 0。

图 4 提取了风场不同位置处的风速剖面, 并将其与下投式探空仪捕捉到的平均风剖面进行比较。根据风剖面所处位置的独特特征, 本文将其分为靠眼壁区域 ( $r/R_{\max}=0.8 \sim 1.2$ ) 剖面 and 台风外围区域 ( $r/R_{\max}=2.0 \sim 3.0$ ) 剖面。如图 4(a) 所示, 从 12 个不同方向分别提取了这三次台风的模拟风剖面, 为了便于比较, 将所有风剖面数据基于 10 m 高度处的风速进行了归一化处理。

分析结果显示, 在靠眼壁区域, 当高度不超过 100 m 时, 参考文献 [13, 15-16] 中给出的三种风剖面均高于模拟的三次台风风剖面, 且参考文献 [13, 15-16] 中的风剖面数据之间的差异相对较小。随着高度的增大, 参考文献 [13, 15-16] 中提出的风剖面出现差异,

但总体上与台风 Haiyan 的模拟风剖面数据吻合得较好。在台风外围区域, 当高度较低时, 参考文献 [13, 15-16] 给出的风剖面较小, 总体与台风 Hagupit 的模拟风剖面较符合。

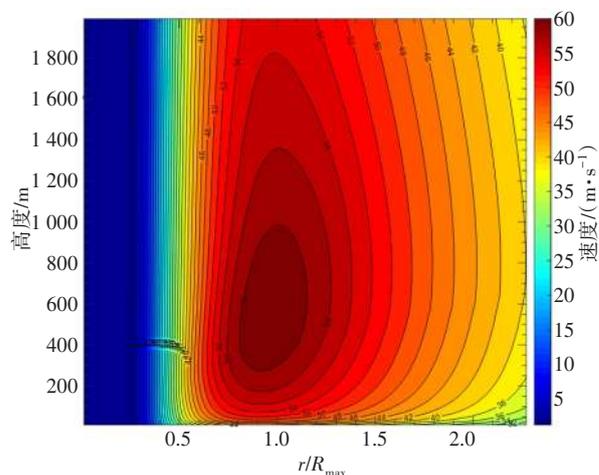
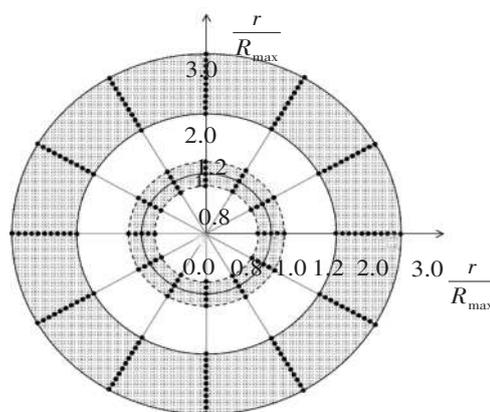
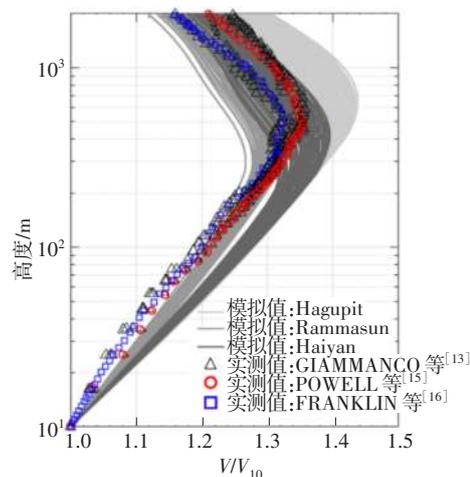


图3 Hagupit 竖向风速剖面 (正东切面)

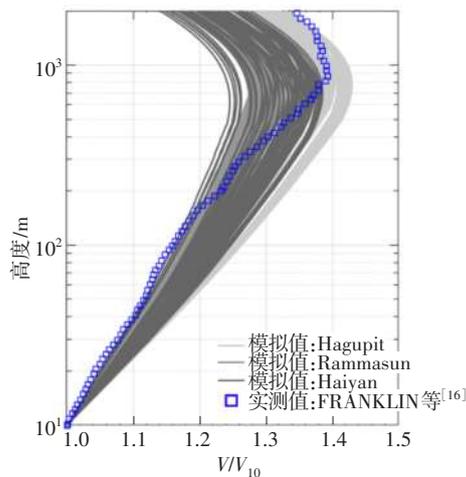
Fig. 3 Hagupit vertical wind profile (due east)



(a) 剖面所处位置



(b) 眼壁区域



(c) 外围区域

图4 竖向风速剖面比较

Fig. 4 Comparison of vertical wind profile

根据上述分析可知,所有风剖面均展现出了超梯度层的特性,即风速在高于梯度高度后逐渐减小,靠近眼壁区域的梯度高度明显比台风外围区域的低。在台风边界层内,风剖面在对数坐标系中趋近于直线分布,符合对数风剖面的典型特征,而梯度高度以上的风速衰减则主要是因为中心压差的减小和径向气压梯度的变化。总体而言,经过模型重构的台风风场与实测风场吻合度较高。

## 2 三维台风随机模拟

预测台风设计风速时采用的最为广泛的方法是 Monte Carlo 随机模拟法,为了实现台风模拟和设计风速预测,计算过程主要分为三个步骤:1) 基于历史数据随机生成大量台风路径样本,主要包含台风各时刻的位置信息(路径模型)、中心气压(强度模型)、风场参数(风场参数模型)等;2) 将每个时刻的路径数据输入台风风场模型中,计算并生成目标场地的台风风速样本;3) 结合模拟年限,估计各重现期的设计风速和风灾曲线<sup>[12,14]</sup>。

台风的风压场模型、最大风速半径模型、风场工程模型<sup>[17]</sup>、路径和强度模型可以概括为两个相对独立的部分。第一部分为风场模型,旨在根据热带气旋的基本信息(如中心压差、移动速度、所处经纬度等)重现台风登陆后的风场结构。第二部分为路径及强度概率统计模型(有时也简称为路径模型),旨在合理地描述热带气旋的登陆位置、登陆频率、登陆时的中心气压、移动方向和移动速度等,同时还包括登陆后的强度衰减模型。在路径模型的发

展历程中,2000年前后出现了显著的方法论转变,早期可以概括为局部路径模型,后期可以概括为全路径模型。台风路径模型的模拟方法可以分为两类:局部路径模拟和全路径模拟。其中,全路径模拟方法主要模拟了台风产生、增强、减弱和消散的全过程,能够全面地模拟出整个沿海地区的台风灾害,准确评估沿海区域的风速设计需求,并实现对目标区域风灾风险的全面评估。美国联邦紧急事务管理署和 ASCE7-16 荷载规范都采用了全路径模拟方法进行计算。而局部路径模拟是以目标点为圆心,以圆形区域内的历史路径为基础数据,开展局部圆形区域的随机模拟,是一种定点模拟方法。这种定点模拟方法具有快速响应特定工程场地需求的特点,并能随着历史数据的不断补充而持续优化模拟结果。

## 3 台风设计风剖面

以上海中心大厦为目标点,采用 Monte Carlo 局部圆形区域随机模拟法和三维台风风场模型,开展了时间跨度为 10 000 年的台风随机模拟,并获取了间隔为 15 min 的各个台风的风剖面演变过程。

### 3.1 方法1:基于规范建议设计风剖面

该方法假设台风剖面形状与现行规范中的保持一致,这也是当前该领域研究中广泛采用的方法。该方法先基于随机模拟所得的台风在 10 m 高度处的风速数据,计算出不同重现期下 10 m 高度处的极值风速。随后,根据我国规范中所推荐的幂律剖面模型(针对地表粗糙度类别为 C 类的地貌,粗糙长度  $z_0=0.3$  m,梯度高度为 450 m),得到基于台风模拟数据且符合规范的建议风剖面。

### 3.2 方法2:设计不同高度相同重现期组合风剖面

针对每次台风,该方法首先提取了不同高度处的最大风速值,构建出每次台风的风剖面外包络线(图5)。这一外包络线代表了该次台风对整个工程场地可能造成的最不利影响。而后,该方法分别计算了每个高度处相同重现期的极值风速,并形成了组合风剖面。受台风剖面特异性的影响,每次台风过程的外包络剖面主要呈现出两种形式:1) 外包络剖面为台风过程中某一时刻的剖面,该类剖面在台风过程中真实存在;2) 外包络剖面由台风过程中不同时刻的剖面组合而成,这类剖面在台风过程中并不真实存在。台风组合剖面的外包络及百年重现

期台风极值风剖面如图6所示。

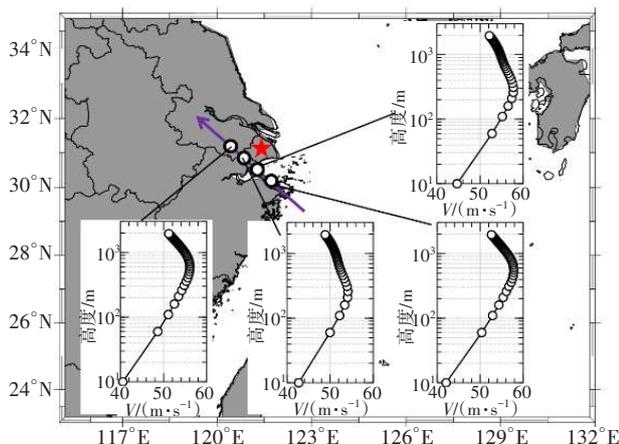


图5 台风过程剖面及外包络剖面

Fig. 5 Typhoon process profile and outer envelope profile

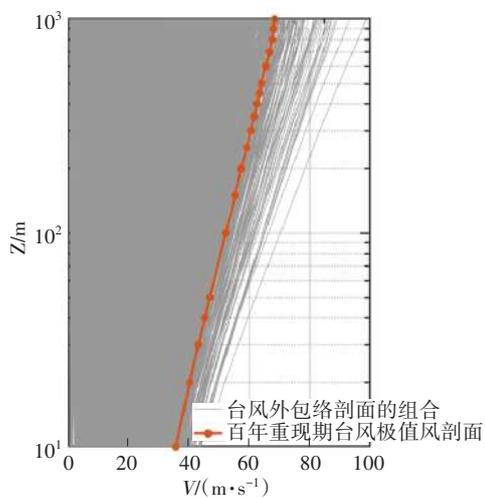


图6 百年重现期剖面

Fig. 6 Profile based on 100-year recurrence period

### 3.3 方法3:设计基于特定高度及重现期风速的真实风剖面

该方法基于某特定高度的重现期风速,在所模拟的10 000年台风数据中,搜索出所有台风过程中满足该重现期风速的真实风剖面。本文基于10 m基准高度处98~102年重现期范围内的极值风速,筛选出符合要求的台风剖面,台风设计风剖面如图7所示,图8为图7剖面的归一化结果。而后,基于筛选出的台风剖面数据,进行100年重现期内的极值风剖面设计,计算筛选出的台风剖面的均值及标准差。

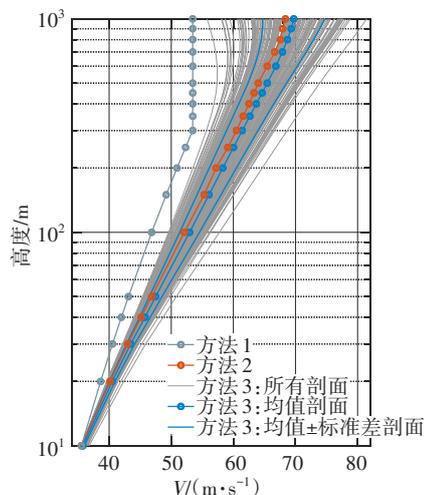


图7 台风设计风剖面

Fig. 7 Typhoon design wind profile

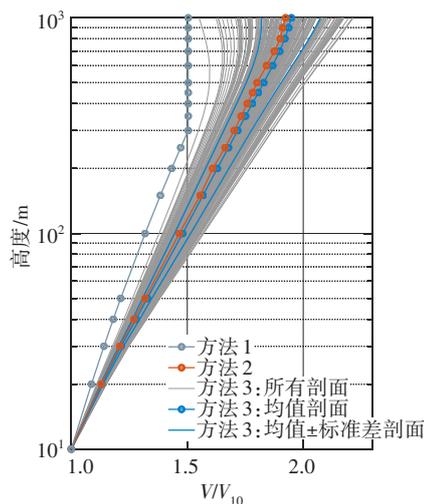


图8 归一化风剖面

Fig. 8 Normalized wind profile

### 3.4 结果对比与讨论

由图7~8可以看出,方法2和方法3所得的风剖面均大于规范剖面。方法1在进行台风剖面设计时,未能充分考虑台风剖面随高度变化的特性,同

时也忽略了台风剖面随空间位置的动态演变。方法2获得的剖面与方法3获得的均值剖面较为接近,但方法2的剖面在真实台风中可能并不存在,方法3所依据的真实风剖面数据中,有接近一半的数据点其风速值高于方法2的结果,这进一步凸显了方法3在捕捉极端风况方面的敏感性。

## 4 风致建筑物的顺风向动力响应

### 4.1 顺风向气动阻尼比

我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)中规定,对于横风向和顺风向的风振,其适用的结构高度在A、B、C和D类地面粗糙度下应分别不超过300、350、450和550 m。然而,在我国沿海地区,已有建筑物的结构高度超过了550 m,且这些建筑位于台风频发的区域,现有的规范已不适用于计算台风气候条件下这类结构的风振响应。如果依然按照我国现行的荷载规范来设计这类超高层结构,可能会导致设计结果与实际台风环境下建筑物的实际响应存在较大差异。

对于矩形截面结构的顺风向振动,可忽略来流湍流的影响而仅考虑平均风速的作用。对于连续结构,其第j阶模态的顺风向气动阻尼系数可以表示为:

$$C_{aero,j} = \rho_a \int_0^H C_d(z)b(z)\bar{U}(z)\phi_j^2(z)dz \quad (10)$$

式中: $\rho_a$ 为空气密度,取 $1.25 \text{ kg/m}^3$ ;  $C_d(z)$ 为高度z处建筑物截面的阻力系数; $b(z)$ 为建筑物截面迎风面的参考宽度; $\bar{U}(z)$ 为来流平均风速; $\phi_j(z)$ 为建筑物的第j阶振型; $H$ 为建筑物截面高度。

气动阻尼比 $\eta_{aero,j}$ 为:

$$\eta_{aero,j} = \rho_a \frac{\int_0^H C_d(z)b(z)\bar{U}(z)\phi_j^2(z)dz}{4\pi n_j G_j} \quad (11)$$

式中: $n_j$ 为建筑物的第j阶模态的自由振动频率; $G_j$ 为广义质量, $G_j = \int_0^L m(z)\phi_j^2(z)dz$ , $m(z)$ 为结构单位长度的质量, $L$ 为结构总高度。

考虑到本小节主要探讨了台风剖面与传统风剖面对建筑物气动阻尼影响的差异,以及台风过程中建筑物随台风剖面的变化而导致的气动阻尼的改变,故将高层建筑简化为方柱模型,简化后的模型尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ ,其 $C_d=2.2$ , $n_1=0.1$

$\text{Hz}$ ,  $m(z)=100000 \text{ kg/m}$ ,  $\phi_j(z) = \sin\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{z}{H}\right)^{1.8}\right]$ 。为简化计算,聚焦于台风剖面与传统风剖面对建筑物气动阻尼影响的差异,在计算过程中假定 $b(z)$ 、 $C_d(z)$ 不随高度的变化而变化。

### 4.2 台风过程中建筑物的顺风向气动阻尼比

根据设计台风风剖面的三种方法,计算每种台风剖面(图7)的气动阻尼比,计算结果如图9~13所示。

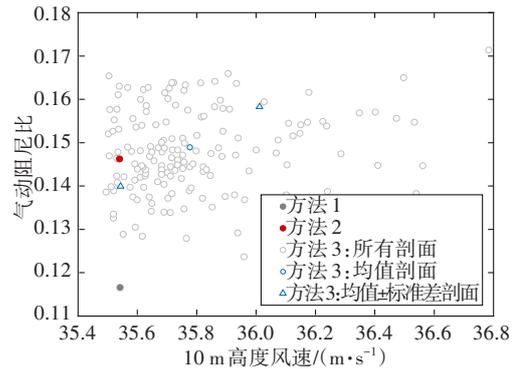


图9 气动阻尼比与10 m基准高度风速的关系

Fig. 9 Relationship between aerodynamic damping ratio and wind speed at 10 m reference altitude

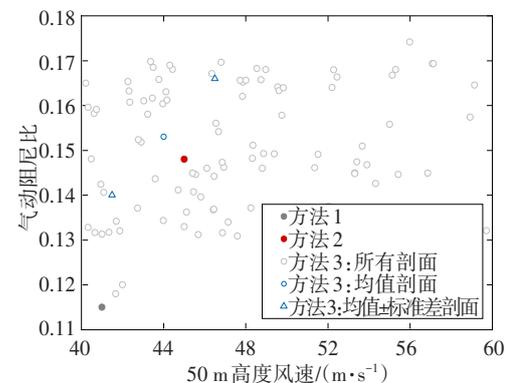


图10 气动阻尼比与50 m高度风速的关系

Fig. 10 Relationship between aerodynamic damping ratio and wind speed at 50 m altitude

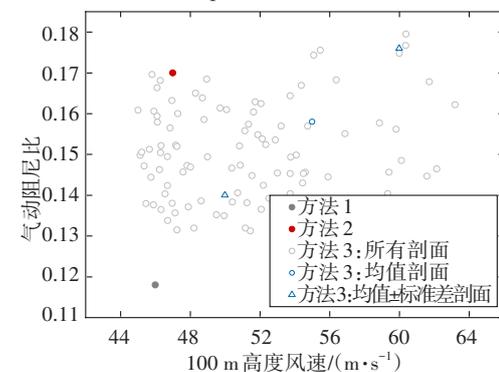


图11 气动阻尼比与100 m高度风速的关系

Fig. 11 Relationship between aerodynamic damping ratio and wind speed at 100 m altitude

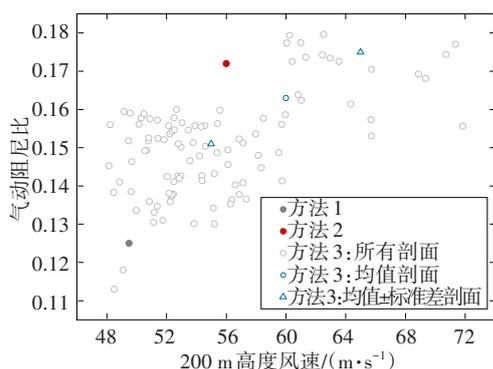


图12 气动阻尼比与200 m高度风速的关系

Fig. 12 Relationship between aerodynamic damping ratio and wind speed at 200 m altitude

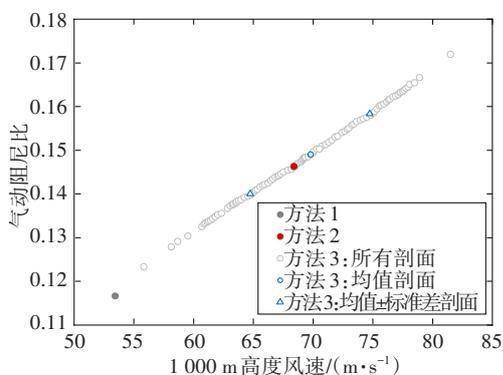


图13 气动阻尼比与1000 m高度风速的关系

Fig. 13 Relationship between aerodynamic damping ratio and wind speed at 1000 m altitude

图9~12分别给出了工程场地处建筑物气动阻尼比与10 m(基准高度)及50、100、200 m(常见建筑高度)处风速的关系。由图9~12可以看出,采用方法1规范剖面法设计的台风剖面的气动阻尼比普遍比方法2和方法3所得的结果低。尽管这三种台风设计风剖面的风速相差较小,但计算出的气动阻尼比却呈现出较大的离散度,且气动阻尼比与这些常见高度处的风速之间并未显示出明确的规律性。

图13给出了建筑物气动阻尼比与1000 m高度处(建筑物顶部)风速的关系,方法1所得的台风设计风剖面气动阻尼比仍比方法2、方法3所得的结果低。由图13可以看出,建筑物气动阻尼比与1000 m高度处的风速呈强相关关系,从而证实了台风设计风剖面的形状对建筑物气动阻尼比的计算具有显著影响。

由图9~13可知,尽管常见高度建筑顶部风速相近,但建筑物的气动阻尼比可能会有显著差距,而这种差异主要取决于台风设计风剖面的具体形状。工程场地处模拟单次台风过程的所有剖面如图14所

示,图14所示台风过程的建筑物气动阻尼比随台风时程的变化如图15所示。由图15可以看出,在一次台风过程中,随着台风剖面的变化,建筑物的气动阻尼比变化剧烈。因此,在一次台风过程中,采用单一气动阻尼比无法准确地评估台风对建筑物的气动影响。

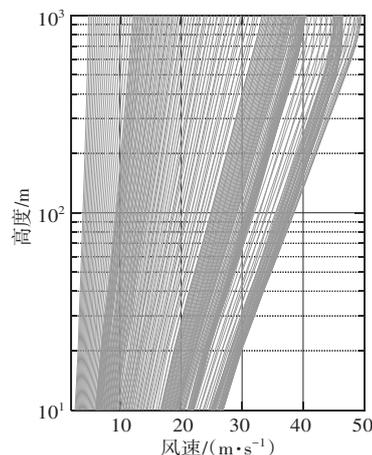


图14 工程场地处单次台风过程剖面

Fig. 14 Single typhoon process profile at engineering site

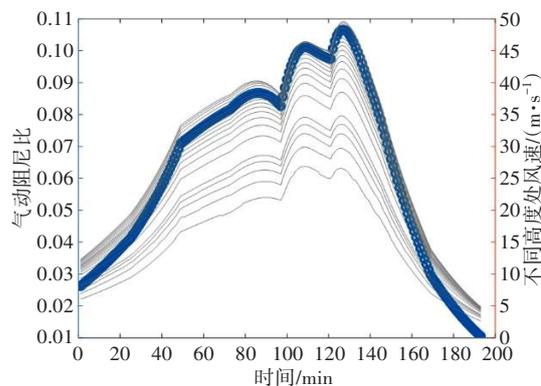


图15 建筑物气动阻尼比随台风时程的变化

Fig. 15 Change of aerodynamic damping ratio of buildings with typhoon duration

## 5 结论

本文基于典型工程场地处10000年 Monte Carlo 台风随机模拟数据,提出了设计台风剖面的三种方法。现行规范中推荐的风剖面可能低于台风实际风剖面,且基于不同高度处100年重现期的风剖面亦无法考虑台风真实剖面。特定高度重现期风速相同时,真实台风剖面存在多种形状,需结合特定结构风荷载特征进行选取。若只考虑风致建筑物的静力响应,则台风设计风剖面可依照方法3的外

包络进行选取,若需考虑风致建筑物的动力响应,则还需结合结构的气弹效应,在台风设计风剖面中考虑真实台风风剖面的演变过程。台风过程中,随着台风剖面的变化,建筑物的顺风向气动阻尼比变化剧烈,且建筑物气动阻尼比与建筑物顶部处的风速呈强依赖关系,在一次台风过程中,用单一气动阻尼比无法评估台风对建筑物的气动影响。

#### 参考文献(References):

- [1] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind effects on structures [M]. Newark: Johns Wiley Press, 1996.
- [2] FRANKLIN J L, BLACK M L, VALDE K. Eye wall wind profiles in hurricanes determined by GPS dropwindsondes [C]//Proceedings of 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. Online: Association for Science and Technology, 2000.
- [3] 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. DOI: 10.1038/nature01481.
- [4] CHOI E C C. Wind loading in Hong Kong: commentary on the code of practice on wind effects [M]. Hong Kong: Hong Kong Institute of Engineers, 2004.
- [5] ISHIZAKI H. Wind profiles, turbulence intensities and gust factors for design in typhoon-prone regions [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 13 (1-3): 55-66. DOI: 10.1016/0167-6105(83)90128-9.
- [6] AMANO T, FUKUSHIMA H, OHKUMA T, et al. The observation of typhoon winds in Okinawa by Doppler sodar [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83 (1-3): 11-20. DOI: 10.1016/S0167-6105(99)00057-4.
- [7] HOLMES J D. Wind loading of structures [M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [8] GIANG L T, TAMURA Y, CAO S Y, et al. Wind speed profiles in tropical cyclones [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 4 (1): 39-48.
- [9] 李利孝,肖仪清,宋丽莉,等.基于风观测塔和风廓线雷达实测的强台风黑格比风剖面研究[J].工程力学, 2012, 29(9): 284-293.  
LI Lixiao, XIAO Yiqing, SONG Lili, et al. Study on wind profile of typhoon hagupit using wind observed tower and wind profile radar measurements [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 284-293.
- [10] 王旭,黄鹏,顾明.台风“梅花”近地风剖面变化[J].同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 1165-1171. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2013.08.008.  
WANG Xu, HUANG Peng, GU Ming. Variation of wind profiles near ground during typhoon “Muifa” [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41 (8): 1165-1171. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2013.08.008.
- [11] SONG L L, CHEN W C, WANG B L, et al. Characteristics of wind profiles in the landfalling typhoon boundary layer [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 149: 77-88. DOI: 10.1016/j.jweia.2015.11.008.
- [12] 赵林,杨绪南,方根深,等.超强台风“山竹”近地层外围风速剖面演变特性现场实测[J].空气动力学学报, 2019, 37(1): 43-54. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2018.0297.  
ZHAO Lin, YANG Xu'nan, FANG Genshen, et al. Observation-based study for the evolution of vertical wind profiles in the boundary layer during super typhoon “Mangkhut” [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37 (1): 43-54. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2018.0297.
- [13] GIAMMANCO I M, SCHROEDER J L, POWELL M D. GPS dropwindsonde and WSR-88D observations of tropical cyclone vertical wind profiles and their characteristics [J]. Weather and Forecasting, 2013, 28 (1): 77-99. DOI: 10.1175/waf-d-11-00155.1.
- [14] KWON D K, KAREEM A. Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings [J]. Engineering Structures, 2013, 51: 23-35. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.01.008.
- [15] POWELL M D, VICKERY P J, REINHOLD T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones [J]. Nature, 2003, 422 (6929): 279-283. DOI: 10.1038/nature01481.
- [16] FRANKLIN J L, LORD S J, MARKS F D. Dropwindsonde and radar observations of the eye of hurricane gloria (1985) [J]. Monthly Weather Review, 1988, 116 (5): 1237-1244. DOI: 10.1175/1520-0493(1988)116<1237: daroot>2.0.co;2.
- [17] FANG G S, ZHAO L, CAO S Y, et al. A novel analytical model for wind field simulation under typhoon boundary layer considering multi-field correlation and height-dependency [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 175: 77-89. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.01.019.

(责任编辑:薛仪)