

偏转风场下高层建筑设计风速的风向折减因子

贺斌, 全涌, 顾明

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 提出了超高层建筑设计风荷载估算过程中考虑风场偏转影响的强风风速风向折减因子修正方法。在风洞中模拟了一个方形截面超高层建筑刚性模型。在偏转风场和无偏风场工况下, 根据提出的修正方法计算了北京地区和南京地区高层建筑设计风速的风向折减因子, 分析了风场偏转对高层建筑气动风压折减效应的影响。结果表明, 偏转风场会使建筑风压存在偏移现象, 最不利风压出现的风向角与无偏风场下不同, 而在考虑风向折减效应的风荷载估算方法中, 如果忽略风场偏转的影响就可能导致超高层建筑风荷载的低估, 使得结构设计偏于危险, 提出的修正方法能够有效解决这一问题。

关键词: 超高层建筑风荷载; 风向折减; Ekman 螺旋线; 偏转风场; 风洞试验

中图分类号: TU973.2

文献标志码: A

Wind Direction Reduction Factor for Design Wind Speed of High-rise Buildings Under Twisted Wind Field

HE Bin, QUAN Yong, GU Ming

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

Abstract: In this paper, the calculation method of modified wind direction reduction factor of strong wind speed considering the influence of twisted flow in the design wind load estimation of super high-rise buildings is proposed. Wind tunnel tests of a square section high-rise building model under twisted and non-twisted wind fields are conducted. Using the proposed correction method, the wind direction reduction factors of design wind speeds of the Beijing and Nanjing regions are calculated. And the influence of twisted flow on the wind direction reduction effect of the aerodynamic force of the building is analyzed. The results show that there is a shift of wind pressures on

the building under the twisted wind field, and the wind direction angles of the most unfavorable wind pressure under the twisted wind field are different from the cases under the non-twisted wind field. In the wind load estimation of the wind direction reduction effect, ignoring the influence of twisted flow may lead to a serious underestimate of the wind load of super high-rise buildings, making the structural design more dangerous. Moreover, the proposed correction method in this paper can effectively solve this problem.

Keywords: wind load of super high-rise building; wind direction reduction; Ekman spiral; twisted flow; wind tunnel test

为了简化起见, 工程上通常忽略强风风速和结构风荷载系数在各风向上的变化特征, 将所有风向下设计风速的最不利值与风荷载系数的最不利值相结合来计算设计风荷载值。然而, 强风风速的最不利值和结构风荷载系数的最不利值实际上常常发生在不同风向上, 这导致真实的结构风荷载值小于甚至远小于最不利值相结合计算得到的结果, 即存在一个风向折减效应问题^[1-3]。目前《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[4]没有考虑极值风速的风向性影响, 但工程实践中风工程师和结构设计者们通常基于气象部门的长期观测数据计算得到目标地区极值风的风向折减因子玫瑰图, 一般采用 16 风向的方法, 风向折减因子的取值范围为 0.85~1.00。

以上均是基于大气边界层风场中的风向不随高度变化这一假设。然而, Ekman^[5]在研究洋面附近的海洋摩擦层时发现, 受科里奥利力影响, 风速矢量随高度增加呈现螺旋状变化, 不同高度处的风向因偏

收稿日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(51778493); 土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题基金(SLDRCE19-B-13)

第一作者: 贺斌, 博士生, 主要研究方向为风向偏转对超高层建筑风荷载的影响。

E-mail: hebin0421@tongji.edu.cn

通信作者: 全涌, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为高层建筑抗风与风速风振实测。

E-mail: quanyong@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

转而不同,即“Ekman 螺线”。目前的绝大部分研究,特别是各国规范以及针对实际超高层建筑的抗风设计^[6-9]并没有考虑风向偏转的影响,使用的极值风速估计方法是以 10 m 高度处 10 min 平均风速的年最大值为分析样本,给出的风向折减因子也是以 10 m 高度处的风向为准。显然,风向偏转现象会使建筑上部风速随风向的变化规律与 10 m 高度处的规律完全不同^[10-16]。

为此,基于经典 Ekman 螺线理论模型计算得到的 500 m 范围内风向沿高度发生的偏转,提出了超高层建筑设计风荷载估算过程中考虑风向偏转影响的强风风速风向折减因子计算方法。根据一方形截面超高层建筑的刚性模型在偏转风场和无偏风场 2 种风场下的测压风洞试验结果,对不同地区和不同建筑朝向时风向偏转下该建筑气动力风向折减效应的影响进行了分析。

1 考虑风向偏转影响的风向折减因子计算方法

1.1 角度定义与典型城市选取

本文涉及多个角度变量,为了避免混淆,在进行理论分析前首先给出各角度变量的定义,如图 1 所示。

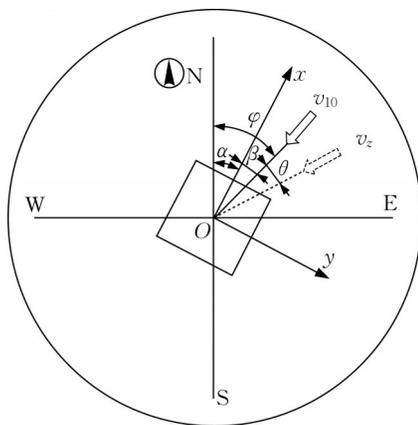


图 1 本文涉及角度定义示意图

Fig.1 Schematic diagram of angle definition

建筑朝向角为建筑物主轴(弱轴) x 方向逆时针旋转到正北方向所扫过的角度 α 。气象观测风向角 φ 为 10 m 高度处来流风速 v_{10} 的方向逆时针旋转到正北方向所扫过的角度,每 22.5° 设置一个气象观测风向角 φ_i 。风洞试验风向角 β 为试验风速方向逆时针旋转到建筑主轴方向所扫过的角度,在风洞试验

中不模拟风向偏转时试验风速方向与足尺 10 m 高度处来流风速 v_{10} 方向一致。建筑模型风洞试验的试验风向角 β 与气象观测风向角 φ 之间差一个建筑朝向角 α ,即 $\beta = \varphi - \alpha$ 。Ekman 螺线风向偏转角 θ 为“Ekman 螺线”现象^[14]导致的高度 z 处来流风速 v_z 与 10 m 高度处来流风速 v_{10} 的方向之间的夹角。这里只考虑北半球,从建筑底部到顶部风向按顺时针方向发生偏转。

受温度、湿度、热分层效应等众多因素的影响,大气边界层理论解析的求解十分困难。Ekman^[5]假设湍流交换系数为常数、气压梯度力不随高度变化并忽略惯性力的作用,建立了气压梯度力、科里奥利力、湍流摩擦力三力平衡模型方程组,即经典 Ekman 螺线理论模型。在强风环境下,忽略温度、湿度、热分层效应等带来的影响,基于经典 Ekman 螺线理论模型通过纬度、高度 2 个参数可以计算得到 Ekman 螺线现象导致的风向偏角。选取 2 个处于不同纬度的中国典型城市进行分析:北京($115.7^\circ\text{E}\sim 117.4^\circ\text{E}$, $39.4^\circ\text{N}\sim 41.6^\circ\text{N}$)、南京($118.4^\circ\text{E}\sim 119.2^\circ\text{E}$, $31.2^\circ\text{N}\sim 32.6^\circ\text{N}$)。2 个城市均位于中国内陆地区,不受台风的影响,属于季风区。

1.2 忽略风向偏转影响的风向折减因子计算

计算各风向的折减因子时,各风向的 R 年重现期设计风速 v_{R,φ_i} 应满足如下 2 个条件^[15]:①所有 N 个风向下的风速年极值 $v_{\varphi_i,\max}(i=1,2,\dots,N)$ 均小于各自风向下的设计风速 v_{R,φ_i} 的概率为 $1-1/R$;②所有风向设计风速 v_{R,φ_i} 的年超越概率相等,为一个定值。 v_{R,φ_i} 的年超越概率数学表达式为:

$$\Pr\{v_{\varphi_i,\max} < v_{R,\varphi_i}, i=1,2,\dots,N\} = 1 - \frac{1}{R} \quad (1)$$

$$\Pr\{v_{\varphi_i,\max} < v_{R,\varphi_i}\} = \text{const}, i=1,2,\dots,N \quad (2)$$

10 m 高度处 φ_i 风向的 R 年重现期设计风速的风向折减因子定义为

$$c_{\text{dir}}(\varphi_i, 10) = \frac{v_{R,\varphi_i}}{\max_{i=1\sim N} v_{R,\varphi_i}} \quad (3)$$

式中, c_{dir} 的自变量 10 指参考风速高度是 10 m。

在结构风荷载及风致响应计算中,将风向折减因子乘以各风向设计风速的最大值就得到各风向的风速设计值。

为了介绍考虑风向偏转影响的风向折减因子修正方法,本节选用不受台风影响的北京地区作为示例。本文采用的风速观测数据均来自于中国气象局。基于风速风向历史记录,通过式(1)~(3)可计

算得到50年重现期设计风速的风向折减因子计算结果,如图2所示。可以看出,北京地区强风主要来自西北方向。

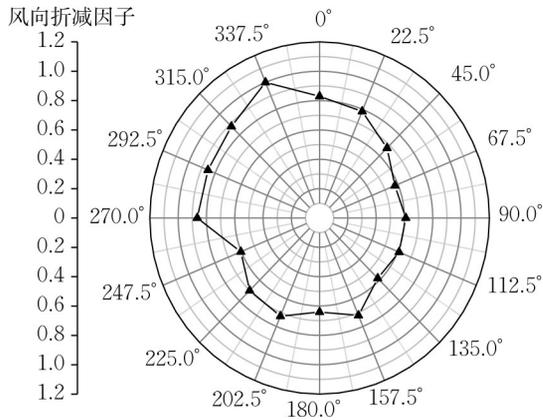


图2 北京地区50年重现期风向折减因子玫瑰图

Fig.2 Rose diagram of wind direction reduction factor for 50-year return period in Beijing

1.3 考虑风向偏转影响的风向折减因子修正

气象部门记录的风速风向数据一般是10 m高度处的10 min平均风速,而风向偏转现象导致风向会随高度发生变化。为研究这一现象对建筑不同高度范围内风荷载风向折减效应的影响,通过经典Ekman理论模型计算得到北京地区500 m高度范围内的风向偏转角,最大偏转角约为 25° 。由于不同高度 z 处来流风向偏转角 θ_z 不同,因此不同高度 z 处的风向折减效应也不同。不同高度 z 处的风向折减因子 $c_{dir}(\varphi_i, z)$ 玫瑰图是以10 m高度处的风向折减因子 $c_{dir}(\varphi_i, 10)$ 玫瑰图为基础,整体按顺时针方向旋转 θ_z 得到。图3为受风向折减影响的50、100、200、300、400、500 m等6个高度处的风向折减因子 $c_{dir}(\varphi_i, z)$ 玫瑰图。

可以看出,在10 m高度处,正北向上的风向折减因子较小,但由于风向随高度发生了偏转,10 m高度处西北偏北向上较大的风向折减因子在500 m高度处偏转到了正北向上,导致500 m高度处正北向上原本较小的风向折减因子因风向偏转变大。

由于风向发生了偏转,因此对于某一确定风向建筑顶部高度处的风向折减因子与10 m高度处的风向折减因子一般是不同的,前者有时比后者更大。目前在工程实践中尚没有很好的方法来解决这一问题,一般都忽视风场的偏转,在常规无偏风场下进行风洞试验,并基于10 m高度处的基本风压及10 m高度处的风向折减因子来计算不同风向的设计风速,

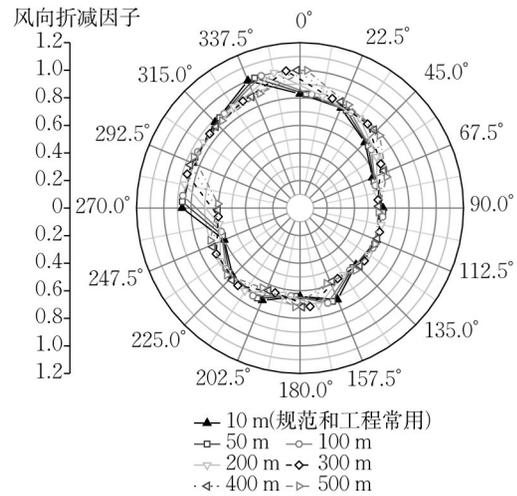


图3 北京地区受风向偏转影响的不同高度处风向折减因子玫瑰图

Fig.3 Rose diagram of wind direction reduction factor at different heights affected by twisted flow in Beijing

从而对超高层建筑风荷载进行估算。事实上,风向偏转现象会对超高层建筑风荷载产生较大的影响,因此部分学者开始在风洞中模拟实际的偏转风场^[10-13]。基于超高层建筑模型风洞试验结果和风压及其风向折减因子进行风荷载估算,虽然该方法计算得到的风荷载是最准确的,但是在风洞中实现风场的偏转非常困难,往往需要研制专门的导流装置^[10-13],无法在实际工程中采纳。为了验证本文提出的基于无偏风场下建筑风荷载风向折减因子修正方法的可行性,也研制了一套导流板系统模拟偏转风场下的工况,但调试偏转风场的过程花费了大量的时间和精力。

考虑工程上的方便性和可操作性,仍通过常规无偏风场下的风洞试验得到风荷载计算结果,但将10 m高度处的风向折减因子用建筑高度范围内的风向折减因子最大值替换,即:

$$c'_{dir}(\varphi_k) = \max_{\varphi_i \in [\varphi_k - \theta_z, \varphi_k]} \{c_{dir}(\varphi_i)\} \quad (4)$$

式中, $c_{dir}(\varphi_i)$ 、 $c'_{dir}(\varphi_k)$ 分别为10 m高度处的风向折减因子和修正后的风向折减因子。

北京地区修正风向折减因子 c'_{dir} 的玫瑰图如图4a所示。相对于10 m高度处的风向折减因子,在 0° 等风向角处的修正风向折减因子明显增大,增大可达50%。风向折减因子经过处理后,计算得到的建筑各高度处风速均不小于考虑和忽略风向偏转影响2种工况的风速值,使得结构风荷载估算结果偏于安全。

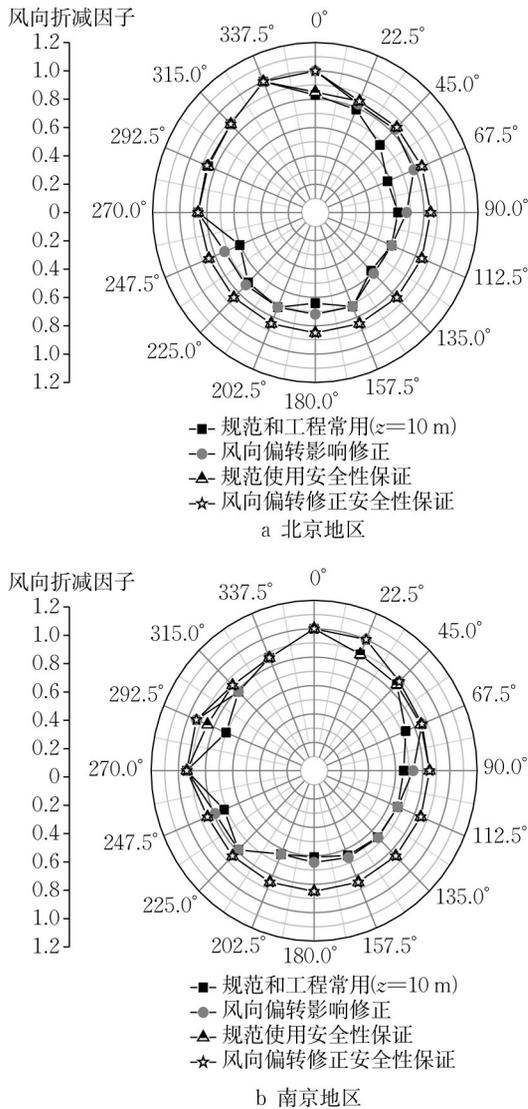


图 4 考虑风向偏转影响的修正风向折减因子玫瑰图
Fig.4 Rose diagram of modified wind direction reduction factor affected by twisted flow

为了保证设计风荷载的计算结果具有足够的安全储备,一些国家规范均对风向折减因子设置下限要求^[6-9]。本文也将折减因子下限设置为0.85,将小于0.85的风向折减因子取为0.85。图4a中,三角形折线段为规范和工程中常用的10 m高度处风向折减因子的安全性保证取值,五角星形折线段为最终的考虑风向偏转影响的风向折减因子玫瑰图。可以看出,在考虑安全储备后,受风向偏转影响的修正风向折减因子变大,北京地区特别是在正北向增大了18%。

在进一步的风荷载分析中,风向折减因子需要从气象观测的风向角映射到风洞试验的风向角,采用工程上常用的线性内插方式完成这个过程。为了对不同城市的结果进行对比,使用该方法还计算了南京地区考虑风向偏转影响的风向折减因子(见图

4b),用于后文实例的风荷载计算。

2 考虑风向折减效应的建筑气动力计算方法和风向偏转影响系数

2.1 气动力计算方法

通过建筑刚性模型测压试验可以积分得到建筑的气动力时程,再通过量纲一化得到考虑风向折减因子后的气动基底弯矩(这里仅以 x 方向气动基底弯矩为例)系数:

$$C'_{M_{xa}}(\beta_j, t) = \frac{M'_{xa}(\beta_j, t)}{BH^2 \rho_H} = \frac{(c'_{dir}(\beta_j))^2 M_{xa}(\beta_j, t)}{BH^2 \rho_H} \quad (5)$$

式中: $M_{xa}(\beta_j, t)$ 、 $M'_{xa}(\beta_j, t)$ 分别为考虑风向折减效应前后的气动基底弯矩; B 、 H 分别为建筑的宽度和高度; ρ_H 为建筑顶部高度处未考虑风向折减效应的来流平均动压; $c'_{dir}(\beta_j)$ 为考虑风向偏转影响的修正风向折减因子,是式(4)的计算结果通过线性插值的方法从气象观测风向角 φ_k 映射到风洞试验风向角 β_j 的结果。由风向折减效应的基底弯矩系数 $C'_{M_{xa}}(\beta_j, t)$ 可以得到平均值 $\bar{C}'_{M_{xa}}(\beta_j)$ 和标准差 $\sigma_{C'_{M_{xa}}}(\beta_j)$ 。基底弯矩系数极值通过 Davenport 峰值因子法求得^[17-18]。

2.2 不同建筑朝向的风向折减效应与风向偏转影响系数

通过线性插值方法转换得到的修正风向折减因子 $c'_{dir}(\beta_j)$ 随建筑朝向角 α 的变化而变化。不同建筑朝向的基底弯矩系数最不利值 $\hat{C}'_{M_{xa}}(\alpha)$ 可以反映建筑朝向对风向折减效应带来的影响,计算式为

$$\hat{C}'_{M_{xa}}(\alpha) = \max_{j=1 \sim M} |c'_{dir}(\beta_j) \hat{C}_{M_{xa}}(\beta_j, \alpha)| \quad (6)$$

本文同时定义了气动基底弯矩的风向偏转影响系数 $\delta_{M_{xa}}$, 分析风向偏转现象对风荷载风向折减效应的影响程度,即与忽略风向偏转影响及风向折减效应的气动基底弯矩系数最不利值之比:

$$\delta_{M_{xa}}(\alpha) = \frac{\hat{C}'_{M_{xa}}(\alpha)}{\hat{C}_{M_{xa}}(\alpha)} = \frac{\max_{j=1 \sim M} |c'_{dir}(\beta_j) \hat{C}_{M_{xa}}(\beta_j, \alpha)|}{\max_{j=1 \sim M} |c_{dir}(\beta_j) \hat{C}_{M_{xa}}(\beta_j, \alpha)|} \quad (7)$$

3 考虑风向折减效应的超高层建筑风荷载计算与分析

3.1 目标建筑和风洞试验概况

为了使结果具有代表性,风洞试验避免采用个

性化的建筑,建筑原型长宽高分别为 $50\text{ m}\times 50\text{ m}\times 450\text{ m}$ 的方形截面超高层建筑,如图5a所示。风洞试验模型的缩尺比设置为1:1 000。

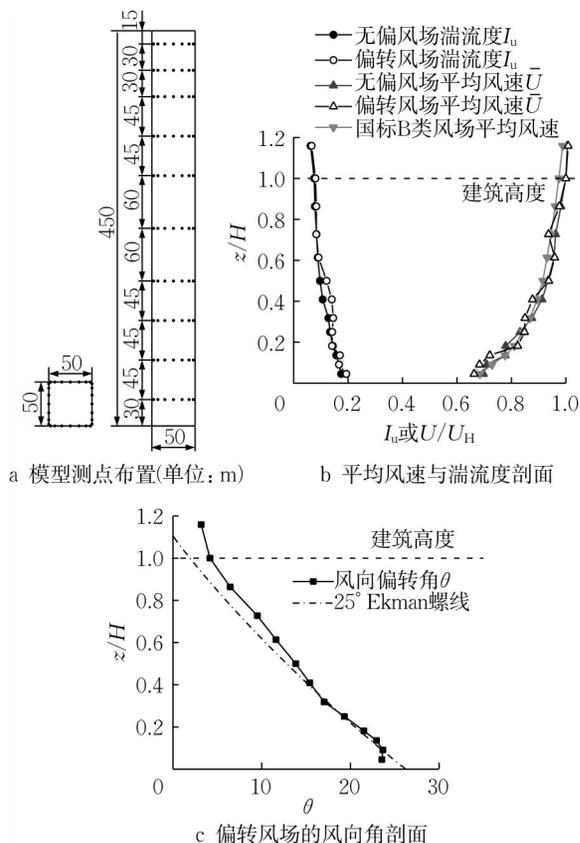


图5 模型测点布置与风场平均风速、湍流度、风向角剖面
Fig.5 Layout of model taps and profiles of mean wind speed, turbulence intensity and twisted angle

本次试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室的TJ-1大气边界层风洞中进行,图6为本次试验的部分照片。本次试验采用中国国家规范中的B类地貌作为试验风场,图5b给出了B类风场的来流平均风速及湍流度剖面,均对建筑高度 H 和建筑顶部风速 U_H 进行了归一化,风速剖面指数目标值为0.15,建筑顶部高度处的湍流度为0.07。试验中以 5° 为间隔,在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 间设置了72个风向角。为了反映Ekman螺线对超高层建筑风荷载的影响,并验证本文提出方法的可行性,本次试验在风洞中模拟了最大偏转角为 25° 的偏转风场,风向偏转角剖面如图5c所示,与北京地区的经典Ekman螺线模型曲线一致。偏转风场的风速剖面 and 湍流度剖面特性与无偏转风场一致,如图5b所示。

3.2 风向偏转对建筑风荷载的影响

图7、8分别为忽略和考虑设计风速风向折减因子2种情况的偏转风场和无偏转风场下基底弯矩系数

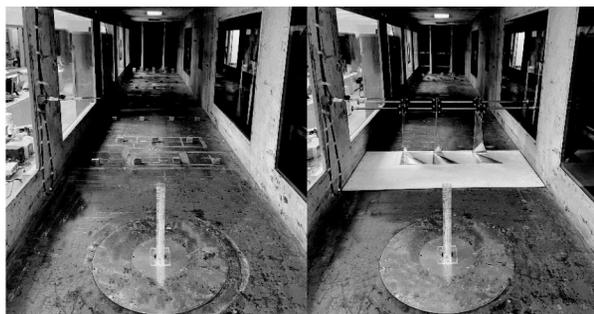


图6 偏转风场风洞试验部分照片

Fig.6 Photos of wind tunnel tests on twisted flow

随试验风向角的变化。考虑设计风速风向折减因子时假定目标建筑处在北京地区,建筑朝向角为 245° 。如图7所示,忽略设计风速风向折减因子时,目标建筑在无偏转风场下的基底弯矩系数平均值、正极大值、负极大值都关于 90° 和 270° 风向角对称分布,在 90° 、 270° 风向角时分别为最大值和最小值。偏转风场下的建筑基底弯矩系数有一个明显的偏移现象:最大极大值出现在 100° 风向角,而不是 90° 风向角,但偏转风场下的最不利基底弯矩系数与无偏转风场下的最不利基底弯矩系数大小基本相等,均为0.83;最不利负极大值出现在 280° 风向角,而不是 270° 风向角。

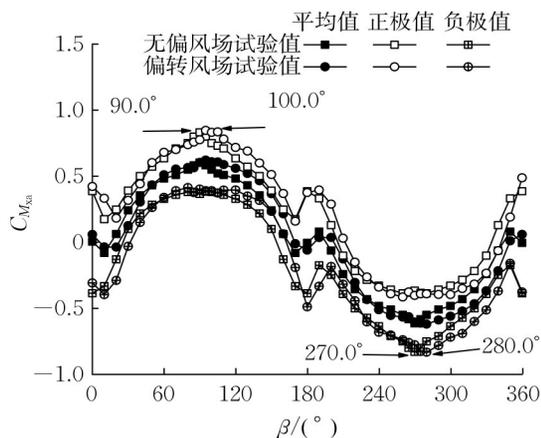


图7 忽略风向折减因子的基底弯矩系数

Fig.7 Base moment coefficients without considering wind direction reduction factor

从图8可以发现,在无偏转风场下考虑风向偏转影响后,建筑基底弯矩系数在某些风向角工况下都有不同程度的提高,如:在 95° 风向角时,忽略风向偏转影响时基底弯矩系数极大值为0.77,考虑风向偏转的影响后提高到0.81。偏转风场下的建筑基底弯矩系数在 95° 风向角时为0.81,如果忽略风向偏转的影响直接使用无偏转风场下的结果,就会使建筑结构偏于危险,但考虑风向偏转影响下通过本文提出的方

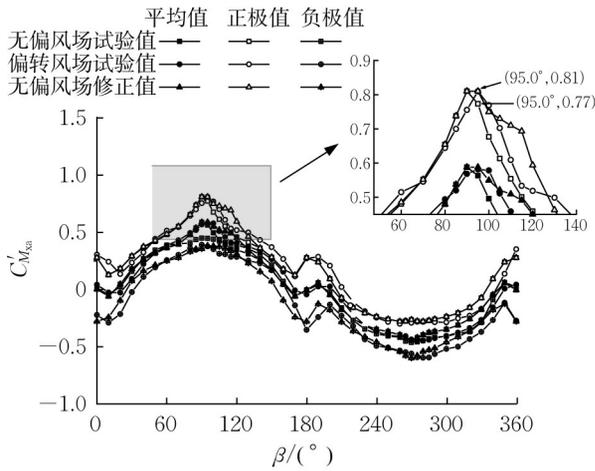


图 8 考虑风向折减因子的基底弯矩系数

Fig.8 Base moment coefficients considering wind direction reduction factor

法对风向折减因子进行修正后,基本上能包络偏转风场对建筑基底弯矩的影响,使建筑结构更加安全。其他风向角以及南京地区的计算结果也得到了相似的结论,限于篇幅,此处不再展示。

计算了无偏风场下考虑和忽略风向偏转影响时不同建筑朝向角 α 工况的基底弯矩系数最不利值,并与偏转风场下考虑风向折减效应的结果进行了对比。图 9 给出了北京地区和南京地区的计算结果。可以看出,在北京地区考虑风向偏转的影响后,建筑朝向角 $\alpha=90^\circ\sim 120^\circ, 260^\circ\sim 300^\circ$ 时的基底弯矩系数最不利值都有不同程度的增大。风向偏转对南京地区的影响更大,在建筑朝向角 $\alpha=0^\circ\sim 50^\circ, 100^\circ\sim 150^\circ, 180^\circ\sim 200^\circ, 280^\circ\sim 320^\circ$ 时,基底弯矩系数最不利值均出现了增大。

对比考虑风向折减效应后偏转风场下的计算结果,偏转风场下的基底弯矩系数最不利值出现的建筑朝向角与无偏风场下忽略风向偏转影响的情况差别很大,存在一个偏移的现象。然而,无偏风场下的风荷载结果在考虑风向偏转影响后,基本上能将偏转风场的结果包络,所以本文提出的修正方法是偏于安全的。如图 9a 所示,当建筑位于北京地区、建筑朝向为 110° 时,忽略风向偏转影响时的无偏风场下建筑基底弯矩系数最不利值(无偏风场试验值)为 0.63,而偏转风场下建筑基底弯矩系数最不利值(偏转风场试验值)可达 0.71,说明忽略风向偏转影响对考虑风向折减效应的设计风荷载影响很大,可能低估的设计风荷载达 17%;考虑风向偏转影响后,在该建筑朝向的无偏风场下建筑基底弯矩系数的最不利值(无偏风场修正值)为 0.75,可以包络偏转风场的

结果,使结构更加安全。

为了进一步观察和分析风向偏转对风荷载风向折减效应的影响程度,图 10 给出了目标建筑基底弯矩的风向偏转影响系数随建筑朝向角的变化。

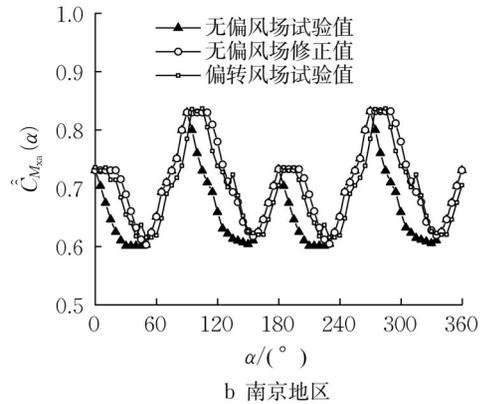
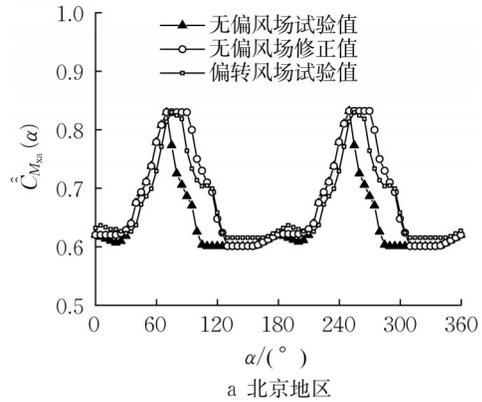


图 9 基底弯矩系数最不利值随建筑朝向角的变化

Fig.9 Most unfavorable value of base moment coefficient at different building orientations

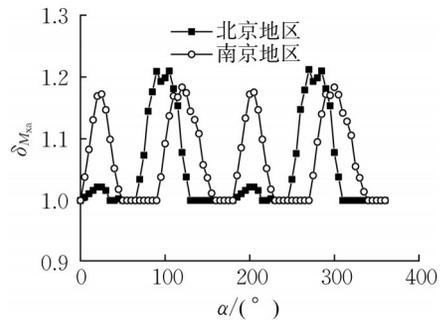


图 10 风向偏转影响系数随建筑朝向角的变化

Fig.10 Twisted flow influence coefficient at different building orientations

从图 10 可以看出,建筑位于南京地区时受风向偏转影响较大,基底弯矩的风向偏转影响系数曲线出现了 4 个峰值,说明在这 4 个建筑朝向角工况时受 Ekman 螺线影响最大;北京地区基底弯矩的风向偏转影响系数曲线峰值主要出现在 90° 和 270° 建筑朝

向角。当目标建筑位于北京地区、建筑朝向角为 270° 时,基底弯矩的风向偏转影响系数最大达到了1.21,所以忽略风向偏转影响可能低估风荷载最大达近17%;南京地区忽略风向偏转影响时最大可能低估15%的风荷载。

从以上的分析可知,在考虑风荷载的风向折减效应时,忽略风向偏转会低估部分风向角的风荷载,使建筑结构偏于危险。偏转风场下目标建筑的风荷载计算结果也证明了这一点。因此,在工程中估算风荷载时,需要考虑风向偏转现象产生的影响。本文提出的风向折减因子修正方法能包络偏转风场产生的影响,是一个偏安全的计算方法。

4 结论

(1)受风向偏转的影响,强风的风向折减因子玫瑰图随高度的变化而偏转,导致基于10 m高度处风向折减因子的超高层建筑风荷载计算结果在某些情况下偏于不安全。

(2)为了保证超高层建筑风荷载估算结果偏于安全,强风的风向折减因子可取建筑顶部以下各高度处风向折减因子的包络值。

(3)偏转风场下的建筑基底弯矩系数曲线有一个明显的偏移现象,出现最不利值的风向角与无偏风场工况相比会偏移一个角度。通过考虑风向偏转影响修正后的风向折减因子和无偏风场下建筑的风荷载来估算超高层建筑的设计风荷载,可以基本包络偏转风场产生的影响,是偏于安全的计算方法。

(4)在考虑风向折减效应的超高层建筑风荷载估算方法中,忽略风向偏转的影响会低估部分朝向工况下的风荷载,使结构设计偏于危险。对于500 m高度的超高层建筑,忽略风向偏转的影响,相比偏转风场下的结果可能导致风荷载低估达近17%。

作者贡献声明:

贺 斌:方法计算,数据处理,论文整体构思与撰写。

全 涌:研究选题,提供研究思路与技术指导,论文审定。

顾 明:研究选题,论文审定。

参考文献:

[1] RAVINDRA M K, CORNELL C A, GALAMBOS T V. Wind and snow load factors for use in LRFD[J]. Journal of the Structural Division, 1978, 104(9): 1443.

[2] DAVENPORT A G. The prediction of risk under wind loading [C]// Proceedings of the Second International Conference on Structural Safety and Reliability. Washington DC: [s. n.], 1972: 511-538.

[3] ELLINGWOOD B. Wind and snow load statistics for probabilistic design[J]. Journal of the Structural Division, 1981, 107(7): 1345.

[4] 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. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.

[5] EKMAN V W. On the influence of the earth's rotation on ocean-currents[J]. Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik, 1905, 2(11): 1.

[6] Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE 7-10[S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2010.

[7] Structural design actions. Part 2, wind actions: AS/NZS1170.2 [S]. Sydney: The Council of Standards Australia, 2010.

[8] Loading for buildings. Part 2, code of practice for wind loads: BS6399-2[S]. London: Technical Committee B/525, 1997.

[9] Recommendations for loads on buildings: AIJ RLB 2004 [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004.

[10] LIU Z, ZHENG C R, WU Y. Wind tunnel simulation of wind flows with the characteristics of thousand-meter high ABL[J]. Building and Environment, 2019, 152: 74.

[11] LIU Z, ZHENG C R, WU Y, *et al.* Investigation on the effects of twisted wind flow on the wind loads on a square section megatall building[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 191: 127.

[12] ZHOU L, TSE K T, HU G. Experimental investigation on the aerodynamic characteristics of a tall building subjected to twisted wind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 224: 104976.

[13] YUAN Y J, YAN B W, ZHOU X H, *et al.* RANS simulations of aerodynamic forces on a tall building under twisted winds considering horizontal homogeneity [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 54: 104628.

[14] FENG C D, GU M, ZHENG D Q. Numerical simulation of wind effects on super high-rise buildings considering wind veering with height based on CFD[J]. Journal of Fluids and Structures, 2019, 91: 102715.

[15] FENG C D, GU M. Numerical simulation of wind veering effects on square-section super high-rise buildings under various wind directions[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102954.

[16] FENG C D, FU G Q, GU M. Numerical simulation of wind veering effects on aeroelastic responses of thousand-meter-scale super high-rise buildings[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 46: 103790.

[17] DAVENPORT A G. Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading[J]. ICE Proceedings, 1964, 28(2): 187.

[18] HOLMES J D. Wind loading of structures [M]. 3rd ed. London: Taylor & Francis Group, 2015.