

## 基于层内力等效的偏心高层建筑三维等效静力风荷载

邹良浩<sup>1,2</sup>, 潘小旺<sup>1,2</sup>, 樊星妍<sup>1,2†</sup>, 梁枢果<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 湖北省城市综合防灾与消防救援工程技术研究中心(武汉大学), 湖北 武汉 430072)

**摘要:**对于质心和刚心不重合的偏心高层建筑, 由于结构三维振型耦合与气动力耦合等因素的影响, 其等效静力风荷载的评估变得十分复杂. 基于振型加速度法, 推导了考虑三维气动力耦合和振型交叉项贡献的偏心高层建筑各层拟静力项和惯性力项内力(剪力和弯矩)响应计算方法. 在此基础上, 基于各层内力响应等效, 建立了能合理反映荷载沿高分布信息的结构三维等效静力风荷载评估方法. 随后, 结合 3 种典型矩形截面高层建筑刚性模型测压风洞试验, 分析了荷载相关性、结构偏心率和截面长宽比对偏心结构三维等效静力风荷载的影响. 研究表明:对于偏心截面高层建筑, 振型交叉项和荷载相关性对结构风致响应与等效静力风荷载的贡献不可忽视, 若忽略两者则会低估偏心高层建筑三维等效静力风荷载, 特别是扭转向等效静力风荷载. 此外, 偏心率和截面长宽比同样影响偏心高层建筑等效静力风荷载的大小和分布情况. 相关研究可为偏心高层建筑的抗风设计提供一定的指导.

**关键词:**高层建筑; 风效应; 等效静力风荷载; 耦合效应; 风洞试验

**中图分类号:** TU311.3

**文献标志码:** A

## Three-dimensional Equivalent Static Wind Loads of Eccentric High-rise Buildings Based on Equivalent Internal Forces

ZOU Lianghao<sup>1,2</sup>, PAN Xiaowang<sup>1,2</sup>, FAN Xingyan<sup>1,2†</sup>, LIANG Shuguo<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Engineering Research Center of Urban Disasters Prevention and Fire Rescue Technology of Hubei Province (Wuhan University), Wuhan 430072, China)

**Abstract:** For eccentric high-rise buildings with non-coincident centers of mass and rigidity, evaluating the three-dimensional (3D) wind induced effect and the equivalent static wind loads (ESWLs) becomes complicated due to the influence of the 3D mode coupling and aerodynamic coupling of the structure. This paper derives a group of equations based on the mode acceleration method. These equations enable calculating the quasi-static and inertial part of internal force (shear and moment) responses for each floor of eccentric rectangular high-rise buildings, considering the effects of coupling vibration modes and cross-correlations between modal responses. On this basis, evaluation methods for 3D internal force ESWLs along the height distribution are derived. Finally, analyses are

\* 收稿日期:2022-06-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478369,5157434), National Natural Science Foundation of China(51478369,5157434)

作者简介:邹良浩(1979—),男,湖北仙桃人,武汉大学副教授,博士生导师

† 通信联系人, E-mail: fanxingyan@whu.edu.cn

conducted to examine the effects of load correlation, structural eccentricity ratio, and aspect ratio on ESWLs combined with three kinds of high-rise building pressure tests. The research results show that for eccentric high-rise buildings, the contribution of mode coupling and load correlation to the structural wind-induced response and ESWLs cannot be ignored. If these two parts are ignored, the three-dimensional equivalent wind load of eccentric high-rise buildings, especially the torsional equivalent wind load, will be underestimated. In addition, different eccentricity ratios and aspect ratios have an impact on the magnitude and distribution of the ESWL for eccentric high-rise buildings. The relevant conclusions can provide guidance for the wind resistance design of eccentric high-rise buildings.

**Key words:** high-rise buildings; wind induced effect; equivalent static wind load; coupling effect; wind tunnel test

为方便高层建筑抗风设计,结构风工程界提出了等效静力风荷载的概念<sup>[1-3]</sup>.等效静力风荷载能反映动力荷载下结构的极值响应,被广泛应用于结构抗风设计中<sup>[4-7]</sup>.

对于质量中心和刚度中心重合的传统非偏心高层建筑,其在风荷载作用下的顺风向、横风向和扭转向的风致响应互不相关,因此可以单独计算分析而不用考虑各方向之间的荷载相关性<sup>[8]</sup>.针对非偏心高层建筑等效静力风荷载的研究,最早可以追溯到 Davenport<sup>[9]</sup>提出的阵风荷载因子法(Gust Loading Factor, GLF).在此基础上,又有多位学者针对此方法进行了改进和发展<sup>[10-13]</sup>.

在实际工程中,有相当一部分建筑出现质量和刚度中心发生偏离的情况,如南宁华润大厦、深圳华侨城大厦等<sup>[14-15]</sup>.这些偏心结构的弯曲振型和扭转振型相互耦合<sup>[16]</sup>,再加上结构三维气动力的相关性,大大增加了该类建筑三维风振响应与等效静力风荷载评估的难度. Kareem<sup>[17]</sup>发现横风向和扭转向的耦合作用将大大增加结构风致响应. Islam 等<sup>[18]</sup>发现结构偏心会导致扭转加速度响应显著增加.

目前针对偏心结构风效应的研究大多集中在响应计算方面<sup>[19-20]</sup>,在等效静力风荷载方面的研究相对较少. Chen 等<sup>[21-22]</sup>提出了一种偏心高层建筑考虑耦合情况的三维等效静力风荷载计算方法,并通过高频测力天平试验验证了该方法的合理性.该方法采用的广义荷载模型只能考虑结构一阶振型的贡献,其等效静力风荷载沿高分布采用了一定的近似处理方法.然而,三维等效静力风荷载的沿高分布情况在高层建筑抗风设计中至关重要,它不仅反映了结构不同高度处的受荷情况,也直接决定了对应高度输出的响应大小<sup>[23]</sup>.

与广义荷载模型相比,通过多点同步测压试验可以得到建筑风荷载准确的沿高分布,近年来被广泛应用于结构抗风风洞试验项目与等效静力风荷载的研究中<sup>[24-25]</sup>.汪大海等<sup>[26]</sup>利用多点同步测压试验,建立了基于层内力等效且可考虑荷载沿高分布的顺风向静力风荷载模型.邹良浩等<sup>[27]</sup>推导了可考虑高阶振型贡献的非偏心高层建筑三维等效静力风荷载评估方法.以上研究对象为非偏心结构,暂未考虑偏心结构等效静力风荷载评估方法.

鉴于此,本文在非偏心截面三维等效静力风荷载评估方法的基础上,结合刚性模型测压试验,推导了偏心高层建筑耦合体系的各层拟静力项与惯性力项的内力响应计算公式.在此基础上,得到了以偏心结构各层内力响应为等效目标且可考虑其沿高分布的三维等效静力风荷载.同时,通过比较3种不同矩形截面高层建筑在6种偏心率下的结构等效静力风荷载,分析了荷载相关性、结构偏心率和截面长宽比对等效静力风荷载的影响.

## 1 偏心高层建筑风致内力响应分析

### 1.1 结构风致响应分析

将高层建筑简化为串联力学层间模型进行风振分析,如图1所示.其风致响应可由动力学基本方程计算得到:

$$M\ddot{Y}(t) + C\dot{Y}(t) + KY(t) = P(t). \quad (1)$$

式中: $t$ 为时间; $P(t)$ 为结构随机风荷载(力或扭矩)向量; $Y(t)$ 为结构位移(角位移)向量; $M$ 、 $C$ 和 $K$ 分别为结构质量(转动惯量)、阻尼和刚度矩阵.

对于质心与形心重合,而刚心偏离的高层建筑(如图1所示),每层有2个平动和1个转动自由度,

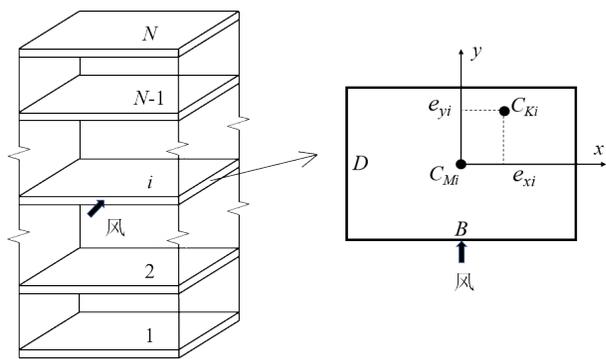


图1 高层建筑结构简化模型示意图

Fig.1 Sketch map of high-rise building structure models

结构的总自由度数为 $3n$ .以每层质心 $C_{Mi}$ 为坐标原点对三维风荷载进行正交分解,即认为荷载作用于每层楼板的质心,楼板上任一点的运动均可视为随楼板质心的平动和绕质心转动的合成, $C_{Ki}$ 为相应楼层的刚度中心.结构横风向 $x$ 和顺风向 $y$ 与扭转方向 $\theta$ 相互耦合,对于耦合结构体系,其 $M$ 、 $C$ 和 $K$ 可表示如下:

$$M = \begin{bmatrix} M_x & 0 & 0 \\ 0 & M_y & 0 \\ 0 & 0 & J_\theta \end{bmatrix}_{3n \times 3n}, \quad (2)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_x & 0 & -e_y C_x \\ 0 & C_y & e_x C_y \\ -e_y C_x & e_x C_y & C_\theta \end{bmatrix}_{3n \times 3n}, \quad (3)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_x & 0 & -e_y K_x \\ 0 & K_y & e_x K_y \\ -e_y K_x & e_x K_y & K_\theta \end{bmatrix}_{3n \times 3n}. \quad (4)$$

位移向量 $Y(t)$ 和荷载向量 $P(t)$ 可表示为:

$$Y(t) = \begin{Bmatrix} Y_x(t) \\ Y_y(t) \\ Y_\theta(t) \end{Bmatrix}_{3n \times 1}, \quad P(t) = \begin{Bmatrix} P_x(t) \\ P_y(t) \\ P_\theta(t) \end{Bmatrix}_{3n \times 1}. \quad (5)$$

式中: $Y_x(t)$ 、 $Y_y(t)$ 和 $Y_\theta(t)$ 以及 $P_x(t)$ 、 $P_y(t)$ 和 $P_\theta(t)$ 分别为结构 $x$ 、 $y$ 和 $\theta$ 方向的位移和荷载向量; $e_x$ 、 $e_y$ 、 $e_\theta$ 分别为结构 $x$ 、 $y$ 和 $\theta$ 方向偏心距离.

采用振型分解法,令

$$Y(t) = \varphi_i q_i(t). \quad (6)$$

式中: $q_i(t)$ 为第 $i$ 阶广义坐标时间函数; $\varphi_i = \{\varphi_x(1) \cdots \varphi_x(n), \varphi_y(1) \cdots \varphi_y(n), \varphi_\theta(1) \cdots \varphi_\theta(n)\}_i^T$ 为结构第 $i$ 阶耦合振型.

将式(6)代入式(1)中,解耦可以得到关于第 $i$ 阶振型的广义坐标 $q_i(t)$ :

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \frac{F_i^*(t)}{M_i^*}. \quad (7)$$

式中: $\xi_i$ 和 $\omega_i$ 分别为第 $i$ 阶振型对应的阻尼比和频率; $F_i^* = [\varphi_{xi} P_x(t) + \varphi_{yi} P_y(t) + \varphi_{\theta i} P_\theta(t)]$ ,为广义力; $M_i^* = (\varphi_{xi} M_x \varphi_{xi}^T + \varphi_{yi} M_y \varphi_{yi}^T + \varphi_{\theta i} J_\theta \varphi_{\theta i}^T)$ ,为广义质量.

对于三维耦合振动结构,其各阶振型频率十分接近,因此其振型交叉项不可忽略.根据随机振动频域法,其第 $i$ 阶振型和第 $m$ 阶振型广义坐标加速度协方差 $\sigma_{qim}^2$ 可表示为:

$$\sigma_{qim}^2 = \int_0^\infty \omega^4 H_i(j\omega) H_m(-j\omega) S_{im}^*(\omega) d\omega. \quad (8)$$

式中: $H_i(j\omega) = 1/(\omega_i^2 - \omega^2 + 2\xi_i \omega_i \omega j)$ 为第 $i$ 阶振型复频响应函数; $j$ 为单位复数; $S_{im}^*(\omega)$ 为第 $i$ 阶和第 $m$ 阶振型的广义荷载互谱.

$$S_{im}^*(\omega) = \frac{\varphi_i^T S_p(\omega) \varphi_m}{M_i^* M_m^*}. \quad (9)$$

式中: $S_p(\omega)$ 为结构荷载谱矩阵,对于三维耦合结构,其三维风荷载谱如下.

$$S_p(\omega) = \begin{bmatrix} S_{xx}(\omega) & S_{xy}(\omega) & S_{x\theta}(\omega) \\ S_{yx}(\omega) & S_{yy}(\omega) & S_{y\theta}(\omega) \\ S_{\theta x}(\omega) & S_{\theta y}(\omega) & S_{\theta\theta}(\omega) \end{bmatrix}_{3n \times 3n}. \quad (10)$$

式中: $S_{sc}(\omega)$ ( $s = x, y, \theta$ ;  $c = x, y, \theta$ )为结构 $s$ 方向和 $c$ 方向风荷载互谱矩阵,该三维风荷载谱可由多点测压风洞试验得到,也可由现有的三维风荷载谱拟合经验公式得到.

## 1.2 风致内力响应分析

在脉动风荷载作用下,结构内力可看作其弹性恢复力,由式(1)可计算如下:

$$F(t) = KY(t) = P(t) - C \sum_i \dot{q}_i(t) \varphi_i - M \sum_i \ddot{q}_i(t) \varphi_i. \quad (11)$$

式中:右边的三项分别为外荷载、阻尼力和惯性力; $\dot{q}_i$ 和 $\ddot{q}_i$ 分别为广义坐标 $q_i(t)$ 关于时间的一、二阶导数, $q_i(t)$ 由公式(7)可得.

对于高层建筑等小阻尼体系,可略去阻尼项,这里忽略阻尼力分量并不意味着忽略建筑物的模态阻尼比.事实上,建筑物的模态阻尼对于评估方程式(1)中的风致响应至关重要,并且在推导模态方程式(6)的解时已经充分考虑了它的影响,则弹性恢复力近似解可表示为:

$$\tilde{F}(t) = P(t) - K \sum_{i=1}^{\delta} \ddot{q}_i(t) \varphi_i. \quad (12)$$

式中: $\delta$ 为截断振型数;等式右边第一项为拟静力项部分,仅与外部风荷载有关;第二项为惯性力项部

分,考虑到高层建筑结构频率一般随振型阶数变化增长较快,等式右边第二项中 $1/\omega_i^2$ 改善了收敛性。

可令 $f_B(t) = P(t)$ 为拟静力项,相当于风荷载的背景分量, $f_1(t) = -K \sum_{i=1}^{\delta} \ddot{q}_i(t) \varphi_i / \omega_i^2$ 为惯性力项,是相关的谐振分量,则风致弹性力可以重写为:

$$f(t) = f_B(t) + f_1(t). \quad (13)$$

弹性恢复力 $f(t)$ 的协方差矩阵,在忽略相比其他两项很小的交叉项后,可表示为:

$$\sigma_f^2 = E[f(t)f(t)^T] \approx \quad (14)$$

$$E[f_B(t)f_B(t)^T] + E[f_1(t)f_1(t)^T] =$$

$$\sigma_B^2 + \sigma_1^2.$$

令 $\sigma_B^2$ 为拟静力项响应方差矩阵, $\sigma_1^2$ 为惯性力项方差矩阵,则有:

$$\sigma_B^2 = E[P(t)P(t)^T], \quad (15)$$

$$\sigma_1^2 = E\left\{ \left[ M \sum_{i=1}^{\delta} \ddot{q}_i(t) \varphi_i \right] \left[ M \sum_{i=1}^{\delta} \ddot{q}_i(t) \varphi_i \right]^T \right\}. \quad (16)$$

考虑到结构的耦合效应, $\sigma_B^2$ 和 $\sigma_1^2$ 可分块表示如下:

$$\sigma_A^2 = \begin{bmatrix} \sigma_{Axx}^2 & \sigma_{Axy}^2 & \sigma_{Ax\theta}^2 \\ \sigma_{Ayx}^2 & \sigma_{Ayy}^2 & \sigma_{Ay\theta}^2 \\ \sigma_{A\theta x}^2 & \sigma_{A\theta y}^2 & \sigma_{A\theta\theta}^2 \end{bmatrix}_{3n \times 3n}. \quad (17)$$

式中: $A = B, I$ 分别表示拟静力项和共振分量, $\sigma_{Asc}^2 (s = x, y, \theta; c = x, y, \theta)$ 为 $n \times n$ 矩阵,为各方向拟静力项和惯性力项方差矩阵. $\sigma_{Bsc}^2$ 的元素可由结构风荷载矩阵计算得到, $\sigma_{Isc}^2$ 的元素可由下式计算得到:

$$\sigma_{Isc}^2(k, l) = \sum_{i=1}^{\delta} \sum_{m=1}^{\delta} \sigma_{ijm}^2 M_s(k, k) M_c(l, l) \varphi_{si}(k) \varphi_{cm}(l). \quad (18)$$

对于三维耦合结构体系,不失一般性,结构拟静力项和惯性力项第 $n$ 层的 $x, y$ 和 $\theta$ 项任意内力响应方差 $\sigma_{Asc}^2(n) (A = B, I; c = x, y, \theta)$ 可表示如下:

$$\begin{aligned} \sigma_{Asc}^2(n) = & \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \sum_{s=c} \sigma_{Asc}^2(i, m) \mu_{sc}(i, n) \mu_{cc}(m, n) + \\ & 2 \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \sum_{s \neq c, s \neq \theta} \sigma_{Asc}^2(i, m) \mu_{sc}(i, n) \mu_{cc}(m, n) + \\ & 2 \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \sum_{s=c, s \neq x} \sigma_{Asc}^2(i, m) \mu_{sc}(i, n) \mu_{cc}(m, n) + \\ & 2 \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \sum_{s=c, s \neq y} \sigma_{Asc}^2(i, m) \mu_{sc}(i, n) \mu_{cc}(m, n). \quad (19) \end{aligned}$$

式中: $\sigma_{Asc}^2(i, m) (s = x, y, \theta; c = x, y, \theta)$ 为结构拟静力项或者共振分量在结构 $s$ 方向第 $i$ 层和第 $c$ 方向第 $m$ 层的协方差,对应于式(17)矩阵的元素; $\mu_{sc}(m, n)$ 为

内力响应函数,表示结构 $s$ 方向第 $i$ 层作用于质心的单位荷载作用引起的 $c$ 方向第 $m$ 层质心的内力响应。

对于剪力或扭矩响应:

$$\mu_{sc}(m, n) = \begin{cases} 1, m \geq n, \\ 0, m < n, \end{cases} \quad s = c = x, y, \theta; \quad (20)$$

$$\begin{cases} \mu_{x\theta}(m, n) = \begin{cases} -e_y, m \geq n, \\ 0, m < n; \end{cases} \\ \mu_{y\theta}(m, n) = \begin{cases} -e_x, m \geq n, \\ 0, m < n. \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

对于弯矩响应:

$$\mu_{sc}(m, n) = \begin{cases} z_i - z_m, m \geq n, \\ 0, m < n, \end{cases} \quad c = x, y. \quad (22)$$

式中: $z_i$ 和 $z_m$ 分别为结构第 $i$ 层和第 $m$ 层楼层标高。

对于剪力、扭矩和弯矩响应:

$$\mu_{xy} = \mu_{yx} = \mu_{\theta x} = \mu_{\theta y} = 0. \quad (23)$$

### 1.3 内力等效静力风荷载评估

高层建筑 $s$ 方向第 $n$ 层在各风向角下内力等效静力风荷载可统一表示为:

$$P_{Es}(n) = \overline{P}_s(n) + g \sqrt{P_{Bs}^2(n) + P_{Is}^2(n)}. \quad (24)$$

式中: $\overline{P}_s(n)$ 为 $s$ 方向第 $n$ 层上平均风荷载; $P_{Bs}(n)$ 和 $P_{Is}(n)$ 分别为 $s$ 方向第 $n$ 层拟静力和惯性力等效静力风荷载; $g$ 为峰值因子。

将上述推导代入相关参数,并结合结构荷载谱信息,结构各方向第 $n$ 层拟静力项内力方差表示为:

$$\sigma_{Bx}^2(n) = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \left[ \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega \right] \mu_{xx}(i, n) \mu_{xx}(m, n); \quad (25)$$

$$\sigma_{By}^2(n) = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \left[ \int_0^{\infty} S_{yy}(\omega) d\omega \right] \mu_{yy}(i, n) \mu_{yy}(m, n); \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{B\theta}^2(n) = & \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \left[ \int_0^{\infty} S_{\theta\theta}(\omega) d\omega \right] \mu_{\theta\theta}(i, n) \mu_{\theta\theta}(m, n) + \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \left[ \int_0^{\infty} S_{yy}(\omega) d\omega \right] \mu_{y\theta}(i, n) \mu_{y\theta}(m, n) + \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \left[ \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega \right] \mu_{x\theta}(i, n) \mu_{x\theta}(m, n) + \\ & 2 \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \left[ \int_0^{\infty} S_{xy}(\omega) d\omega \right] \mu_{x\theta}(i, n) \mu_{y\theta}(m, n) + \\ & 2 \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \left[ \int_0^{\infty} S_{x\theta}(\omega) d\omega \right] \mu_{x\theta}(i, n) \mu_{\theta\theta}(m, n) + \\ & 2 \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \left[ \int_0^{\infty} S_{y\theta}(\omega) d\omega \right] \mu_{y\theta}(i, n) \mu_{\theta\theta}(m, n). \quad (27) \end{aligned}$$

考虑内力等效,则由拟静力项等效静力风荷载引起的各方向第 $n$ 层内力等于拟静力项引起的第 $n$ 层内力响应均方根:

$$\sigma_{B_x}(n) = \sum_{i=1}^n P_{B_x}(n) \mu_{x_x}(i, n); \quad (28)$$

$$\sigma_{B_y}(n) = \sum_{i=1}^n P_{B_y}(n) \mu_{y_y}(i, n); \quad (29)$$

$$\sigma_{B_{\theta}}(n) = \sum_{i=1}^n [P_{B_x}(n) \mu_{x_{\theta}}(i, n) + P_{B_y}(n) \mu_{y_{\theta}}(i, n) + P_{B_{\theta}}(n) \mu_{\theta_{\theta}}(i, n)]. \quad (30)$$

将式(25)~(30)联立可得各层拟静力项等效静力风荷载. 各方向第  $n$  层惯性力项内力方差为:

$$\sigma_{I_x}^2(n) = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \sigma_{I_{x_x}}^2(i, m) \mu_{x_x}(i, n) \mu_{x_x}(m, n); \quad (31)$$

$$\sigma_{I_y}^2(n) = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \sigma_{I_{y_y}}^2(i, m) \mu_{y_y}(i, n) \mu_{y_y}(m, n); \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{I_{\theta}}^2(n) = & \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \sigma_{I_{\theta\theta}}^2(i, m) \mu_{\theta\theta}(i, n) \mu_{\theta\theta}(m, n) + \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \sigma_{I_{x_{\theta}}}^2(i, m) \mu_{x_{\theta}}(i, n) \mu_{x_{\theta}}(m, n) + \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \sigma_{I_{y_{\theta}}}^2(i, m) \mu_{y_{\theta}}(i, n) \mu_{y_{\theta}}(m, n) + \\ & 2 \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \sigma_{I_{x_y}}^2(i, m) \mu_{x_{\theta}}(i, n) \mu_{y_{\theta}}(m, n) + \\ & 2 \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \sigma_{I_{x_{\theta}}}^2(i, m) \mu_{x_{\theta}}(i, n) \mu_{\theta\theta}(m, n) + \\ & 2 \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \sigma_{I_{y_{\theta}}}^2(i, m) \mu_{y_{\theta}}(i, n) \mu_{\theta\theta}(m, n). \quad (33) \end{aligned}$$

考虑内力等效, 则由惯性力项等效静力风荷载引起的各方向第  $n$  层内力应该等于惯性力项引起的第  $n$  层内力响应均方根:

$$\sigma_{I_x}(n) = \sum_{i=1}^n P_{I_x}(n) \mu_{x_x}(i, n); \quad (34)$$

$$\sigma_{I_y}(n) = \sum_{i=1}^n P_{I_y}(n) \mu_{y_y}(i, n); \quad (35)$$

$$\sigma_{I_{\theta}}(n) = \sum_{i=1}^n [P_{I_x}(n) \mu_{x_{\theta}}(i, n) + P_{I_y}(n) \mu_{y_{\theta}}(i, n) + P_{I_{\theta}}(n) \mu_{\theta_{\theta}}(i, n)]. \quad (36)$$

将式(31)~(36)联立可以求得各层惯性力项等效静力风荷载. 需要说明的是, 为了保持统一, 等效静力风荷载作用点仍为建筑每层的质心.

## 2 风洞试验

结构刚性模型测压试验在武汉大学 WD-1 边界层风洞实验室进行. 试验模拟 C 类地貌如图 2 所示, 模拟风速谱如图 3 所示. 模型长宽比共 3 种, 截面为矩形, 模型参数见表 1, 几何缩尺比均为 1/400, 用来模拟 360 m 高、72 层的矩形截面高层建筑, 每个模型

布置 6 层共 192 个测压点, 模型照片如图 4 所示. 定义偏心率为  $r_x = 2e_x/B$ ,  $r_y = 2e_y/D$ , 每个试验模型计算工况参数见表 2. 为简单起见, 设所有楼层的结构偏心率相同, 以长宽比为 1:1 的模型 M1 为例, 图 5 显示了每个偏心情况下质心  $C_M$  和刚度中心  $C_K$  的位置.

采用的刚性模型试验暂未考虑气弹效应的影响, 此部分误差可以通过引入气弹参数进行修正, 已有不少学者对此进行了研究并给出了气弹参数建议值<sup>[28-30]</sup>.

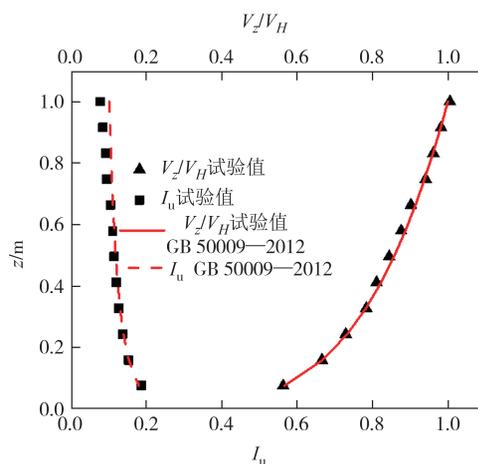


图 2 平均风速与 C 类地貌湍流度模拟

Fig.2 Simulation of average velocity and turbulence profile of class C boundary layer

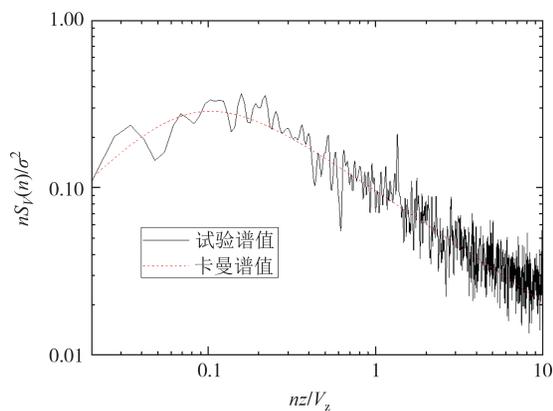


图 3 归一化风速谱

Fig.3 Normalized wind speed power spectrum

表 1 模型参数统计表

Tab.1 Model parameters

模型名称	高度/m	D×B /m	D/B	截面示意图
M1	0.9	0.150×0.150	1/1	
M2	0.9	0.212×0.106	2/1	
M3	0.9	0.106×0.212	1/2	

表2 不同计算工况偏心率

Tab.2 Eccentricities of different calculation conditions

单x偏心		单y偏心		双偏心d	
$r_x$	$r_y$	$r_x$	$r_y$	$r_x$	$r_y$
0	0	0	0	0	0
10	0	0	10	10	10
20	0	0	20	20	20
30	0	0	30	30	30
40	0	0	40	40	40
50	0	0	50	50	50



图4 试验模型

Fig.4 Tested models

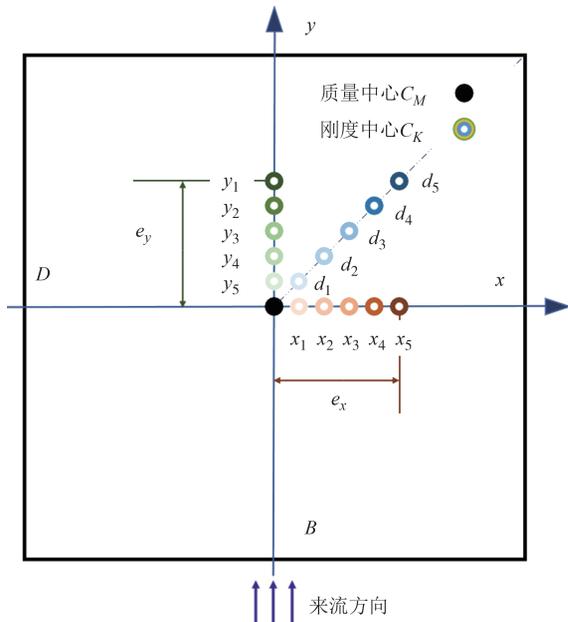


图5 M1模型偏心示意图(B/D=1/1)

Fig.5 Eccentricity cases in building M1(B/D=1/1)

### 3 算例与分析

#### 3.1 建立模型

根据不同截面模型的长宽比建立 360 m 高的 M1、M2、M3 有限元模型,以确定结构的动态特性。

表3列出了每栋建筑模型构件的详细信息,图6为三座建筑物有限元模型立面和截面示意图.需要指出的是,此有限元模型是非偏心模型,在得到非偏心结构的特征矩阵后(即质量和刚度矩阵),引入不同工况下的偏心距 $e$ ,利用公式(2)~(4)得到偏心结构的质量和刚度矩阵,最终代入下述特征方程得到偏心结构的模态属性:

$$(K - \omega^2 M)\varphi = 0. \tag{37}$$

式中: $K$ 、 $M$ 分别为偏心结构的刚度矩阵和质量矩阵; $\omega$ 和 $\varphi$ 分别为所求的频率和振型。

表3 有限元模型构件尺寸

Tab.3 Dimensions of structural elements of the FEM buildings

构件	参数/mm
柱子(B×W)	1 200×1 200
梁(B×D)	300×800
剪力墙(t)	400
板(t)	120

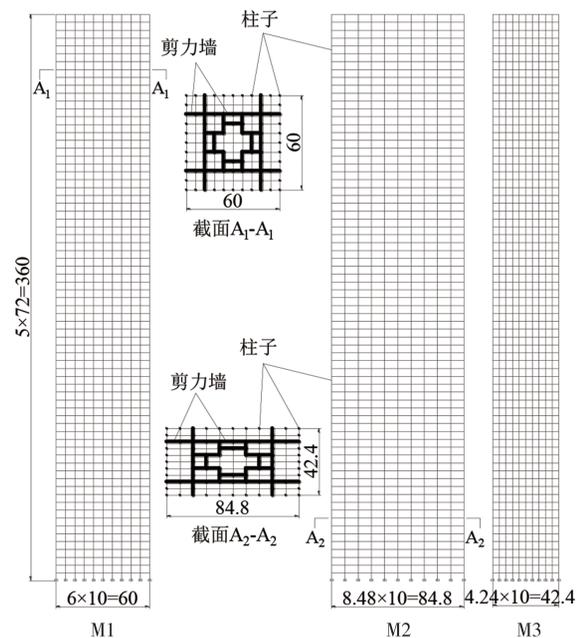


图6 M1、M2和M3建筑结构体系(单位:m)

Fig.6 Structural systems of building M1、M2 and M3(unit:m)

根据有限元建立非偏心模型,得到其前6阶振型频率,见表4.图7为非偏心结构前3阶振型图,对于非偏心结构每阶频率只呈现一个主要模态.若以双偏心在偏心率为30%时为例,图8显示了每种结构的前3阶振型,此时偏心建筑出现耦合振型。

在确定偏心高层建筑等效静力风荷载时,需要考虑模态相关性以及荷载相关性.其中,Chen<sup>[21-22]</sup>等学者对模态相关而导致SRSS和CQC结果之间存在的差异进行了系统的研究,而荷载相关性对等效静

表 4 结构前 6 阶频率  
Tab.4 The first six frequencies of the structure

模型	B/D	频率/Hz					
		1	2	3	4	5	6
M1	1/1	0.145	0.146	0.300	0.620	0.625	0.928
M2	2/1	0.136	0.168	0.352	0.767	0.795	1.184
M3	1/2	0.136	0.168	0.352	0.767	0.795	1.184

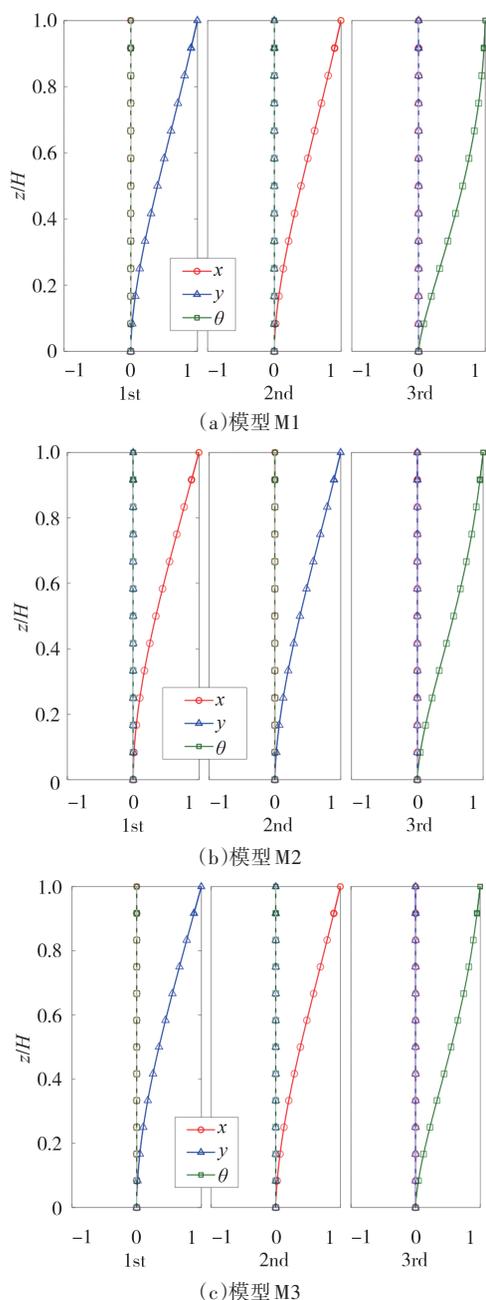


图 7 非偏心结构的前 3 阶振型

Fig.7 First three mode shapes of constructed buildings without structural eccentricities

力风荷载的影响却少有学者涉及.由方程式(31)和(36)可以看出,横风向、顺风向和扭转风荷载都将影响偏心建筑物的风致扭矩.由于等效静力风荷载是

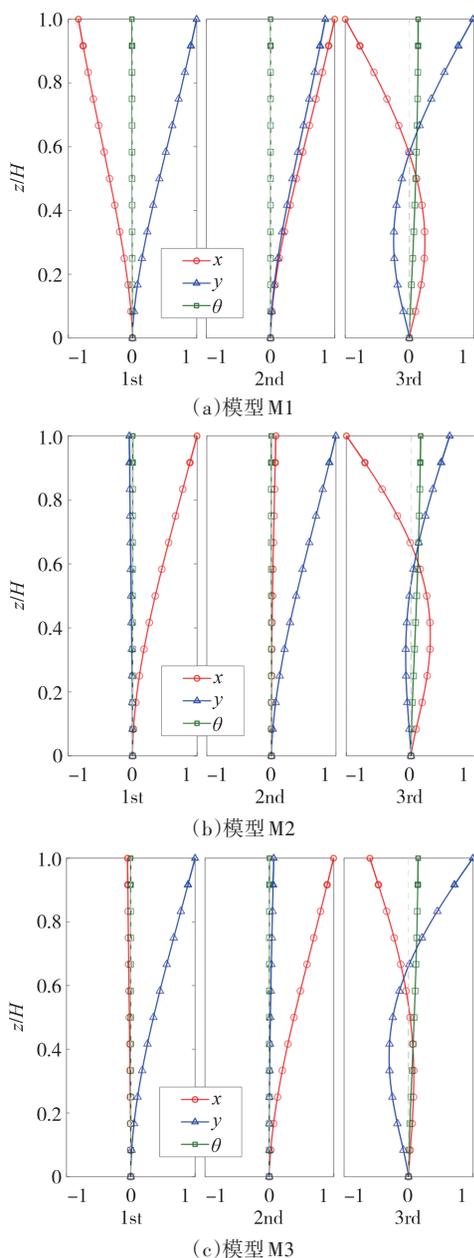


图 8 偏心结构的前 3 阶振型

Fig.8 The first three modes of the eccentric structure with structural eccentricities

根据内力等效性确定的,因此等效静态扭转风荷载将受到荷载相关性的影响,本节除了要考虑结构偏心率和截面长宽比的影响外,还将研究荷载相关性对高层建筑等效静力风荷载的影响.

### 3.2 不同计算方法下的等效静力风荷载

为比较广义风荷载模型和本文提出的沿高分布的荷载模型在计算等效静力风荷载时的差异,以双偏心且偏心率为 30% 的高层建筑 M1 模型为例,采用广义荷载(Generalized Wind Loading, GWL)模型和沿高分布荷载(Along-height Distributed Wind Loading, AWL)模型计算结构等效静力风荷载.图 9(a)~(c)

为采用两种不同计算方法得到的等效静力风荷载对比图. 图9(a)为顺风向等效静力风荷载对比情况, 可以看出, 在  $1/2H$  高度以下的等效剪力被低估了, 在 60 m 时出现最大绝对误差 -120 kN, 相对误差达到 31%. 而在  $4/5H$  高度范围等效静力风荷载又被过多地考虑, 在 300 m 时相对误差达 13%. 图9(b)和图9(c)为横风向和扭转向等效静力风荷载对比情况, 横风向在较低高度时等效静力风荷载相对误差甚至超

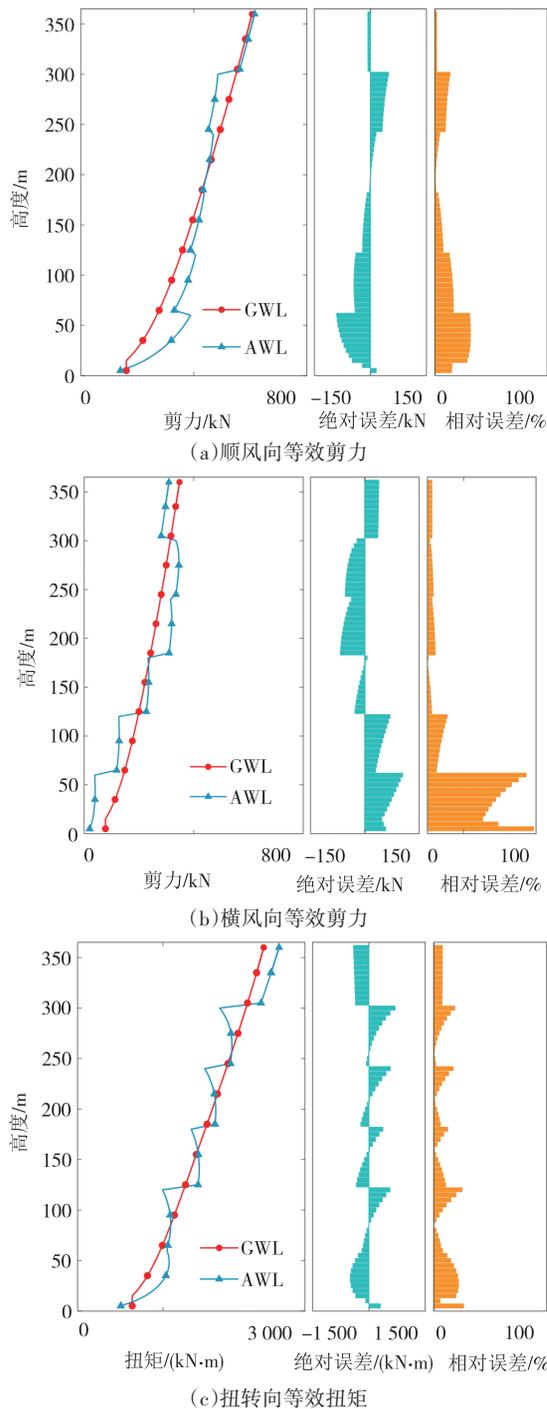


图9 不同计算方法下的等效静力风荷载对比

Fig.9 Comparison of ESWLs under different methods

过了 100%, 扭转向在个别楼层相对误差也达到了 30%.

上述结果表明, 虽然使用两种风荷载模型得到的等效静力风荷载的总体趋势接近, 但在多数特定楼层结果显示显著差异. 直接原因是广义风荷载模型缺乏风荷载的空间信息, 不能考虑楼层间荷载相关性, 而沿高度分布风荷载模型可以弥补此种不足. 因此, 采用本文提出的等效静力风荷载分析方法可以更准确和清晰地体现等效静力风荷载在结构上的沿高分布, 结果可为相关设计人员提供参考.

### 3.3 荷载相关性对等效静力风荷载的影响

从前述 1.3 节公式(25)~(36)可以看出, 体现荷载相关性的  $S_{x\theta}$ 、 $S_{y\theta}$  和  $\mu_{x\theta}$ 、 $\mu_{y\theta}$  等项并不会影响水平方向  $x$ 、 $y$  的等效剪力, 因此本节将仅研究荷载相关性对等效扭矩的影响. 图 10 为荷载相关性对等效扭矩背景分量和共振分量的影响, 其中横坐标  $T_{with}$  为考虑荷载相关效应的各楼层等效扭矩,  $T_{not}$  为忽略荷载相关效应的各楼层等效扭矩.

如图 10(a)所示, 对于顺风向、横风向和双向偏

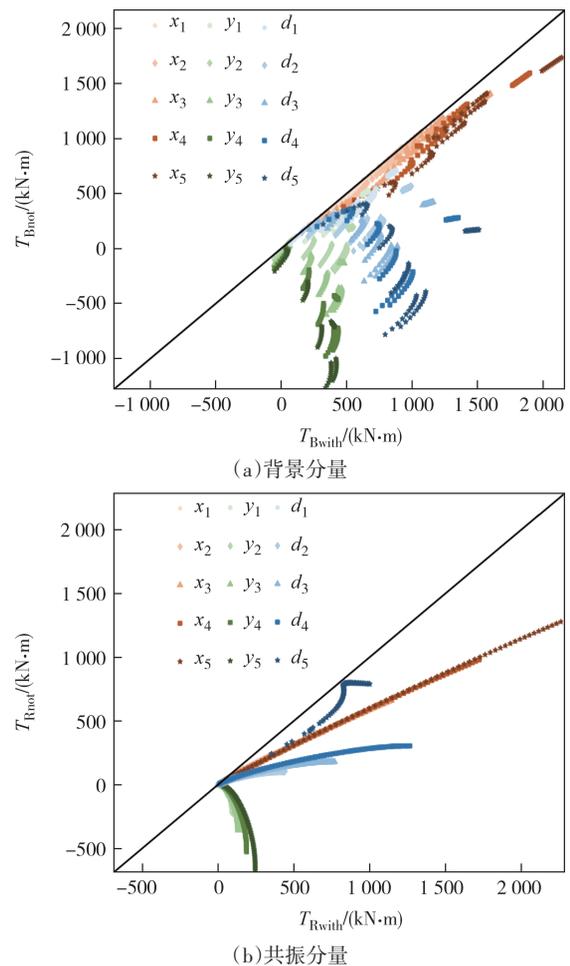


图 10 荷载相关性对等效扭矩的影响

Fig.10 The effect of load-correlation on the equivalent torques

心的情况,背景等效扭矩值都在斜对角线以下,表明不考虑荷载相关性会低估偏心高层建筑的正等效扭矩或高估负等效扭矩.特别地,对于顺风向偏心和双偏心情况,等效扭矩受荷载相关性的影响更大,这是因为横风与扭转方向之间的荷载相关性强于顺风和扭转方向之间的荷载相关性.因此,耦合贡献项在顺风偏心和双偏心模型情况下对风致响应的影响大于横风向偏心情况.如图10(b)所示,共振分量在考虑和不考虑荷载相关效应时差异同样明显,所有工况下等效扭矩的共振分量散点都低于斜对角线.因此,在估计等效扭矩的背景和共振分量时,应特别考虑荷载相关性的影响.

### 3.4 结构偏心率对等效静力风荷载的影响

不同的结构偏心率会产生不同的结构耦合效果,也意味着带来不同的等效静力风荷载.因此,本节将研究结构不同偏心率对等效静力风荷载的影响.文中第3.4节和第3.5节中的等效静力风荷载为公式(24)中定义的总等效静力风荷载,且峰值因子取2.5.

引入用来描述结构偏心对等效静力风荷载的偏心因子 $\eta_r$ ,其定义如下所示:

$$\eta_r = \frac{P_{Secc}}{P_{Ssym}} \quad (38)$$

式中: $P_{Secc}$ 为偏心结构等效基底静力风荷载; $P_{Ssym}$ 为非偏心结构等效基底静力风荷载;下标S可为 $x$ 、 $y$ 和 $\theta$ ,分别对应横风、顺风或扭转方向.

图11(a)~(c)依次为顺风向、横风向和扭转向等效基底荷载的偏心因子比较.偏心因子 $\eta_r = 1$ 时表明偏心对结构等效静力风荷载没有影响,当该值偏离1时表明偏心对结构等效静力风荷载存在影响,且偏离值越大影响越大.如图11(a)和(b)所示,无论哪种偏心以及偏心程度,偏心因子在1附近基本不变,这说明结构偏心对 $x$ 、 $y$ 方向等效静力风荷载的影响是微不足道的.相比之下,结构偏心对等效静风扭矩有显著影响.如图11(c)所示,当结构为顺风向偏心时,偏心因子与结构偏心率负相关,在偏心率为40%时, $\eta_r$ 出现最小值0.66.对于横风向偏心和双偏心情况,偏心因子随着偏心率的增加而快速增加.特别是对于横风向偏心情况,在偏心率为50%时对结构等效扭矩影响最大,此时偏心因子为3.17.因此,可以说明当结构存在横风向偏心时对扭转向等效静力风荷载影响最为明显且偏心率越大影响越大.

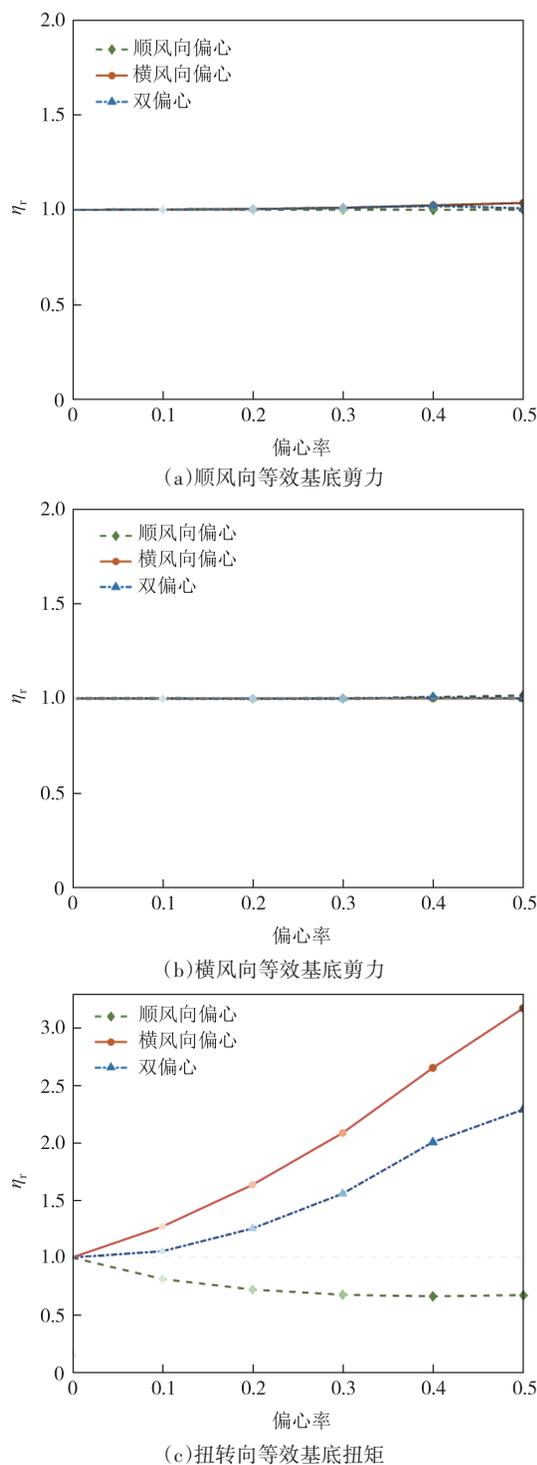


图11 结构偏心对等效静力风荷载的影响  
Fig.11 Influence of eccentricity on ESWLs

### 3.5 截面长宽比对等效静力风荷载的影响

对于矩形截面高层建筑,不同的长宽比代表着具有不同的迎风宽度和深度,也将承受着不同的风荷载,因此本节将讨论截面长宽比对等效静力风荷载的影响,引入上节所述的偏心因子 $\eta_r$ 来衡量影响程度.在3.4节中可以看出结构偏心几乎不影响两个

水平方向上的等效基底剪力,因此本节仅讨论等效基底扭矩.

如图12所示,可以明显地看出所有工况下偏心因子都偏离1,即三种不同截面形式结构的等效扭矩会受到结构偏心影响.其中,偏心因子随着长宽比的变化而变化,当 $D/B=1/2$ 时偏心因子的范围为0.40~2.72, $D/B=1/1$ 时偏心因子范围为0.66~2.65,在长宽比 $D/B$ 达到最大的 $2/1$ 时范围缩小至0.39~1.26.换言之,具有较大长宽比的建筑物往往受结构偏心的影响更小.这可以借公式(31)和(36)加以说明,从3.3节可知在三个偏心方向中横风向偏心对等效静力风荷载的影响最大,而对于横风向偏心情况,在计算等效扭矩的分项[如: $2 \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n \sigma_{iy\theta}^2(i, m) \mu_{y\theta}(i, n) \mu_{\theta\theta}(m, n)$ ]时都需乘相应的偏心距离 $\mu_{y\theta}$ ,偏心距离是偏心率与宽度的乘积,当宽度 $B$ 为三个模型中最小尺寸42.4 m时,建筑物受结构偏心的影响最小.因此,截面长宽比也是影响结构等效静力风荷载的重要参数.

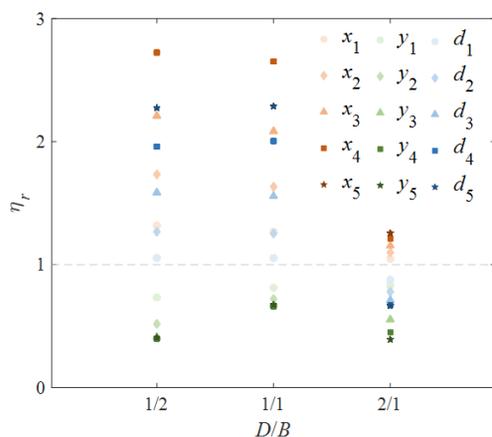


图12 不同长宽比对等效扭矩偏心因子的影响

Fig. 12  $\eta_r$  for equivalent base torques of buildings with different side ratios

## 4 结论

本文基于结构动力学理论和振型加速度法,结合多点测压风洞试验,推导了以弹性力表示的弯扭耦合体系风致内力响应公式,进一步得到了可以体现高层建筑沿高分布情况的顺风向、横风向和扭转向等效静力风荷载.最后使用本文方法,综合分析了荷载相关性、结构偏心率和建筑长宽比对偏心高层建筑等效静力风荷载的影响.相关结论如下:

1) 本文提出了一种较为准确和有效的评估偏

心高层建筑等效静力风荷载的方法,体现了更为合理的等效静力风荷载沿高度分布特性,可以更好地了解偏心结构在不同高度处的荷载分布情况.

2) 在大多数情况下,忽略荷载相关性会低估偏心高层建筑的正等效扭矩(高估负等效扭矩),特别是当结构偏心为顺风向或对角方向时.

3) 当结构偏心为横风向或双向偏心时,等效基底力矩随偏心率的增加而增大,即在这种情况下偏心会导致等效静力风荷载的增加.如结构偏心工况为 $x_5$ 时,偏心与非偏心等效基底力矩差异最大为217%;在工况为 $d_5$ 的情况下差异为129%.但是,当结构偏心存在于顺风向时,等效基底扭矩与结构偏心率呈负相关,即此类偏心会导致等效静力风荷载减小.以偏心工况 $y_4$ 为例,此时等效基底力矩仅为非偏心情况下的66%.

4) 截面长宽比也是影响结构等效静力风荷载的重要参数,高层建筑等效静力风荷载值在截面长宽比越小时越容易受到结构偏心的影响,而截面长宽比越大则受结构偏心的影响越小.在结构偏心比相同的情况下, $D/B=1/2$ 的建筑物等效基底扭矩比非偏心建筑物的等效基础扭矩增加了172%,而 $D/B=1/1$ 和 $2/1$ 的建筑物分别增加了165%和26%.

需要说明的是,本文等效静力风荷载可直接通过多点测压模型风洞试验数据计算得到,也可由经验拟合公式计算,适用范围广泛,可为结构设计提供参考.

## 参考文献

- [1] SOLARI G. Mathematical model to predict 3-D wind loading on buildings[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(2): 254-276.
- [2] LIANG S G, LIU S C, 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(12/13/14/15):1757-1770.
- [3] LIANG S G, LI Q S, LIU S C, et al. Torsional dynamic wind loads on rectangular tall buildings[J]. Engineering Structures, 2004, 26(1):129-137.
- [4] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.  
Load code for the design of building structure: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [5] Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures: ASCE7-16[S]. Reston, VA: ASCE, 2016.
- [6] Recommendations for loads on buildings: AIJ2004 [S]. Tokyo: Architectural Institution of Japan, 2004.

- [7] Structural design actions, Part 2: wind actions: AS/NZS1170. 2 [S]. Sydney: Joint Standards Australia/ Standards New Zealand Committee, 2009.
- [8] LIANG S, ZOU L H, WANG D H, et al. Analysis of three dimensional equivalent static wind loads of symmetric high-rise buildings based on wind tunnel tests [J]. Wind and Structures, 2014, 19: 565-583.
- [9] DAVENPORT A G. The application of statistical concepts to the wind loading of structures [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1961, 19(4): 449-472.
- [10] KASPERSKI M, NIEMANN H J. The L. R. C. (load-response-correlation) - method a general method of estimating unfavourable wind load distributions for linear and non-linear structural behaviour [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43(1/2/3): 1753-1763.
- [11] YIN Z, KAREEM A, MING G. Equivalent static buffeting loads on structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 126(8): 989-992.
- [12] 顾明,叶丰. 高层建筑风致响应和等效静力风荷载的特征[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 93-98.  
GU M, YE F. Characteristics of wind induced responses and equivalent static wind loads of tall buildings [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(7): 93-98. (in Chinese)
- [13] TALLIN A, ELLINGWOOD B. Wind induced lateral torsional motion of buildings [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(10): 2197-2213.
- [14] 张文华,徐麟,隋晓,等. 445 m超高层建筑核心筒偏心收进设计难点研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(4): 52-57.  
ZHANG W H, XU L, SUI X, et al. Research on design difficulty of corewall eccentric indentation in 445 m high super tall building [J]. Building Structure, 2020, 50(4): 52-57. (in Chinese)
- [15] 魏琰,刘维亚,王森,等. 深圳华侨城大厦结构设计若干问题探讨[J]. 建筑结构, 2015, 45(20): 1-7.  
WEI L, LIU W Y, WANG S, et al. Discussion on problems of OCT (Shenzhen) Tower structural design [J]. Building Structure, 2015, 45(20): 1-7. (in Chinese)
- [16] 施天翼,邹良浩,梁枢果. 基于强迫振动的高层建筑扭转向气弹效应[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 93-99.  
SHI T Y, ZOU L H, LIANG S G. Torsional aero-elastic effects of high-rise buildings based on forced vibration [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(1): 93-99. (in Chinese)
- [17] KAREEM A. Lateral torsional motion of tall buildings to wind loads [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(11): 2479-2496.
- [18] ISLAM M S, ELLINGWOOD B, COROTIS R B. Wind induced response of structurally asymmetric high rise buildings [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(1): 207-222.
- [19] HUANG M F, CHAN C M, KWOK K C, et al. Cross correlations of modal responses of tall buildings in wind-induced lateral-torsional motion [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(8): 802-812.
- [20] 唐意,顾明,金新阳. 偏心超高层建筑的风振研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 178-182.  
TANG Y, GU M, JIN X Y. Research on wind-induced response of structurally asymmetric tall buildings [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(2): 178-182. (in Chinese)
- [21] CHEN X Z, KAREEM A. Dynamic wind effects on buildings with 3D coupled modes: application of high frequency force balance measurements [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(11): 1115-1125.
- [22] CHEN X Z, KAREEM A. Coupled dynamic analysis and equivalent static wind loads on buildings with three-dimensional modes [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131: 1071-1082.
- [23] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.  
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [24] 李寿英,陈政清. 超高层建筑风致响应及等效静力风荷载研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(3): 32-37.  
LI S Y, CHEN Z Q. Experimental and theoretical study on wind induced responses and effective static wind load on super-high-rise buildings [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(3): 32-37. (in Chinese)
- [25] 李毅,李秋胜. 基于风致响应的高层建筑等效静力风荷载优化设计研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(4): 26-31.  
LI Y, LI Q S. Wind-induced response based equivalent static wind load optimum design for tall building [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(4): 26-31. (in Chinese)
- [26] 汪大海,梁枢果. 基于内力的高层建筑顺风向等效静力风荷载研究[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 134-140.  
WANG D H, LIANG S G. Along-wind equivalent static load of high-rise buildings [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 134-140. (in Chinese)
- [27] 邹良浩,梁枢果,汪大海,等. 基于风洞试验的对称截面高层建筑三维等效静力风荷载研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(11): 27-35.  
ZOU L H, LIANG S G, WANG D H, et al. Analysis of three dimensional equivalent static wind loads on symmetrical high-rise buildings based on wind tunnel tests [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(11): 27-35. (in Chinese)
- [28] MARUKAWA H, KATO N, FUJII K, et al. Experimental evaluation of aerodynamic damping of tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 59(2/3): 177-190.
- [29] CHENG C M, LU P C, TSAI M S. Acrosswind aerodynamic damping of isolated square-shaped buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12/13/14/15): 1743-1756.
- [30] CHEN Z S, TSE K T, KWOK K C S, et al. Measurement of unsteady aerodynamic force on a galloping prism in a turbulent flow: a hybrid aeroelastic-pressure balance [J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 102: 103232.