第44卷 第6期
2012年6月

哈 尔 滨 工 业 大 学 学 报
JOURNAL OF HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Vol. 44 No. 6
Jun. 2012

超高层建筑在风重耦合作用下响应分析

钟振宇[1,2]，楼文娟[1]

（1. 浙江大学 建筑工程学院，310058 杭州；2. 浙江工业职业技术学院 建筑工程学院，312000 浙江 绍兴）

摘 要：风重耦合效应是指高耸结构在风荷载作用下水平变形会受到重力的影响.为了有效分析超高层结构的风重耦合效应，文中建立了结构计算模型，推导了结构在风荷载和重力荷载共同作用下的动力方程，对结构自振周期、风振系数以及结构响应值的风重耦合效应影响系数进行计算与分析.参数分析表明：考虑风重耦合作用后结构自振周期变长，风振系数减小，同时超高层结构的重刚比、弯剪刚度比和竖向外形锥度的增长会加大风重耦合效应.建议对重刚比较大、体型复杂的超高层建筑进行风重耦合计算.

关键词：超高层建筑；等效静力风荷载；风重耦合效应

中图分类号：TU312　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0367－6234(2012)06－0131－05

Analysis of response of extra-high buildings acted by wind load and gravity

ZHONG Zhen-yu[1,2], LOU Wen-juan[1]

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 310058 Hangzhou, China;
2. School of Civil Engineering, Zhejiang Industry Polytechnic College, 312000 Shaoxing, Zhejiang, China)

Abstract: Wind-gravity coupling effect(WGCE) is horizontal deformation that is caused by wind and enlarged by gravity. In order to analyze WGCE of extra-high building structure, the model of structure was established and derivation of dynamic equations was presented in the paper. WGCE coefficients of structure frequency, wind fluttering factor and response of structure were calculated and analyzed. The result shows that natural period of vibration becomes longer and wind vibration factor decreases as WGCE is taken into account in the calculation. WGCE will become evident if gravity-rigidity ratio, bending-shearing ratio and taper of tall building structure increase. It is suggested to take into account WGCE when calculating the structure of extra-high building with large gravity-rigidity ratio and complex sharp.

Key words: extra-high building; equivalent wind load; wind-gravity coupling effect(WGCE)

近年来随着社会经济发展，高层建筑的数量急剧递增，结构设计中也出现新的问题.高层建筑主控荷载是横向作用力，有风荷载和地震荷载两种.在一般的结构分析中，由于结构在弹性范围内结构产生小变形，横向作用力与竖向重力产生相互影响不大，因此各种力产生效应可以独立计算，然后进行叠加.

通过多年的工程实践，高层建筑在规范限定条件下，结构刚度较大，水平向位移很小，可以不考虑横向荷载和竖向重力荷载的耦合作用.从现有文献来看，国内外对重力二阶效应的研究主要集中在结构抗震领域[1－4]，我国的一些结构设计规范对此也有详细规定[5－8].随着超限高层结构发展，特别是超高层建筑的不断出现，工程设计中要面对更多的高柔结构，风重耦合效应问题日显突出.在一些沿海抗震设防烈度低的地区横向荷载中风荷载占主导地位，超高层结构横向变形大，重力荷载产生附加弯矩，进而增大的横向变形，因此十分有必要分析高柔结构风重耦合效应的影响程度.

高层建筑结构设计上一般采用等效静力风荷载，而等效静力风荷载与风谱及结构的自特性相关，因此本文从等效静力风荷载和结构受力响应两方面来分析重力耦合作用的效应.

收稿日期：2011－04－29.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51178424).
作者简介：钟振宇(1970—)，男，教授，博士研究生；
楼文娟(1963—)，女，教授，博士生导师.
通信作者：楼文娟，louwj@zju.edu.cn.

1 计算模型和方程

考虑重力耦合计算的方法很多,在结构分析中较多采用有限元方法. 本文目的是分析结构的整体效应,可以不考虑建筑细部受力问题,为了提高计算效率,采用质量集中模型,即按楼层离散建筑的结构,将质量集中于楼层,受力构件处于层间,同时考虑层间弯曲变形和剪切变形,通过建立方程组并求解,得到整个结构的响应.

如图 1 所示,分析单元以楼层为单位,层间构件在横向力作用下变形包括剪切变形和弯曲变形,假设在 i 楼层处的水平位移为 u_i,质量为 m_i,楼面转动惯量为 J_i, 剪切刚度为 K_{si},弯曲刚度为 K_{bi},楼层质量中心与弯曲刚度中心的偏移为 e_i. 以上参数在实际工程中很容易得到.

在结构的分析单元上,作用在楼层上的力与变形的下标用 $i+1$ 表示,楼层下部的力与变形的下标用 i 表示. 例如:楼层下面构件综合变形,由弯曲引起的转角为 θ_i,由剪切引起的转角为 γ_i.

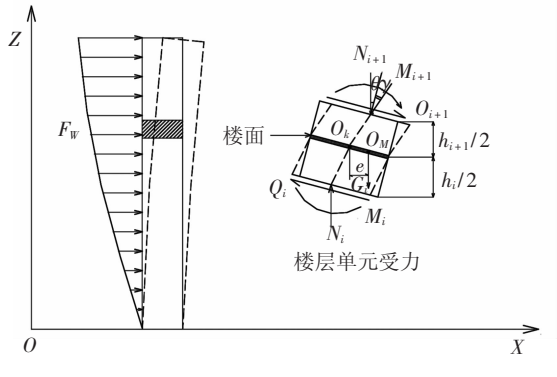

图 1 高层结构在风荷载和重力作用下内力与外力分析

对于楼层上端的弯矩由材料力学关系,进行离散得

$$M_{i+1} = K_{bi+1}\frac{\theta_{i+1}-\theta_i}{h_{i+1}}.$$

由几何关系 $\dfrac{\partial u}{\partial y} = \theta + \gamma$,得到剪切变形 γ,再由材料力学关系可以得到楼层上端剪力为

$$Q_{i+1} = K_{si+1}[u_{i+1} - u_i - (\theta_{i+1} + \theta_i)h_{i+1}/2].$$

结构产生的阻尼由层间构件产生,分为两个部分:由剪切运动产生的阻尼和由拉压运动产生的阻尼. 拉压产生阻尼力形成弯曲阻尼,对于楼层上端弯矩表达式为

$$M_{Di+1} = \mu_{bi+1}K_{bi+1}\frac{\dot\theta_{i+1}-\dot\theta_i}{h_{i+1}}.$$

剪切产生的阻尼力楼层上端可以表示为

$$Q_{Di+1} = \mu_{si+1}K_{si+1}[\dot u_{i+1} - \dot u_i - (\dot\theta_{i+1} + \dot\theta_i)h_{i+1}/2].$$

同样可得到楼层下端力的表达式. 有了结构的内力和外力,可建立中间楼层受力平衡方程.

X 方向横向力平衡方程为

$$m_i\ddot u_i = Q_{i+1} - Q_i + Q_{Di+1} - Q_{Di} + F_{wx,i}.$$

力矩平衡方程为

$$J_{xi}\ddot\theta_{xi} = M_{i+1} - M_i + M_{Di+1} - M_{Di} + Q_{i+1}h_{i+1}/2 + Q_ih_i/2 + Q_{Di+1}h_{i+1}/2 + Q_{Di}h_i/2 + m_ige_{xi} + \Big(\sum_{j=i+1}^{n}m_jg\Big)\Big(\frac{u_{i+1}-u_i}{2}\Big) + \Big(\sum_{j=i}^{n}m_jg\Big)\Big(\frac{u_i-u_{i-1}}{2}\Big).$$

以上是中间层结构的平衡方程,底部和顶部的方程在考虑边界条件以后同样可得到. 综合各方程,可以写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_{11} & \boldsymbol{M}_{12}\\ \boldsymbol{M}_{21} & \boldsymbol{M}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{\boldsymbol{U}}\\ \ddot{\boldsymbol{\Theta}}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\boldsymbol{C}_{11} & \boldsymbol{C}_{12}\\ \boldsymbol{C}_{21} & \boldsymbol{C}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{U}}\\ \dot{\boldsymbol{\Theta}}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\boldsymbol{K}_{11} & \boldsymbol{K}_{12}\\ \boldsymbol{K}_{21} & \boldsymbol{K}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}\\ \boldsymbol{\Theta}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{F}_1\\ \boldsymbol{F}_2\end{bmatrix}. \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{U}$ 为各楼层在 x 方向的位移向量,$\boldsymbol{\Theta}$ 为各楼层绕 y 轴的转角向量,$\boldsymbol{F}_1$ 为 x 方向各楼层风荷载向量,$\boldsymbol{F}_2$ 是由于楼层质量偏心产生绕 y 轴方向的力矩向量,$\boldsymbol{M}_{11}$ 和 $\boldsymbol{M}_{22}$ 分别是以楼层质量和楼层转动惯量为对角元素其他元素为零的矩阵,$\boldsymbol{M}_{12}$ 和 $\boldsymbol{M}_{21}$ 为零矩阵. 刚度矩阵和阻尼矩阵表达式冗长不再列出.

本文分析等效静荷载作用,不考虑动力作用,式(1)退化为

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{K}_{11} & \boldsymbol{K}_{12}\\ \boldsymbol{K}_{21} & \boldsymbol{K}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}\\ \boldsymbol{\Theta}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{F}_1\\ \boldsymbol{F}_2\end{bmatrix}. \tag{2}$$

2 等效静力风荷载

根据风荷载和结构响应的特点,将风荷载分为 3 部分:平均风荷载、背景风荷载、共振响应荷载.

2.1 平均风荷载

风速时程曲线可以分成两部分:平均分量与脉动分量. 风速平均分量不会引起结构振动,在高层结构上 z 高度处,单位长度上的平均风荷载可用下式表示

$$\bar f(z) = \frac{1}{2}\rho_a\bar U^2(z)C_d(z)b(z).$$

式中:ρ_a 为空气密度,$\bar U(z)$、$C_d(z)$、$b(z)$ 为一定高度处平均风速、阻力系数和参考宽度.

由于近地风的风速随高度呈指数变化:$\bar U(z) = \bar U_H\Big(\dfrac{z}{H}\Big)^{\alpha}$,$H$ 为建筑物高度,$\bar U_H$ 为建筑物顶部的风速,α 为风剖面指数,因此上式可写为

$$\bar f(z) = \frac{1}{2}\rho_aC_d(z)b(z)\bar U_H^2\Big(\frac{z}{H}\Big)^{2\alpha}. \tag{3}$$

2.2　背景风荷载

背景风荷载是由低于结构基频的阵风引起的准静态响应. 1992 年 Kasparski 和 Niemann[9] 推导得到荷载响应相关公式，后来叶丰、顾明等[10-11]针对高层建筑提出了更为简化的背景风量计算公式

$$f_B(z) = C_b J_{zb} J_{xb}\left(1 - t\frac{z}{H}\right)\left(\frac{z}{H}\right)^{2\alpha}. \tag{4}$$

式中 $f_B(z)$ 为 z 高度上风荷载分布值.

参数 C_b、$J_{xb}(h)$，$J_{zb}(h,H,\alpha)$ 由下式决定

$$C_b = g_B \rho_a C_d(z) \bar{U}_H \sigma_u,$$

$$J_{xb}(h) = \frac{2b(0)}{b(h)+b(H)}\sqrt{5\,000\left(\frac{B_1}{50} + \mathrm{e}^{-\frac{B_1}{50}} - 1\right)},$$

$$J_{zb}(h,H,\alpha,\beta) = \frac{(\alpha+1)H^{\alpha}}{H^{\alpha+1}-h^{\alpha+1}}\sqrt{7200\left(\frac{H-h}{60} + \mathrm{e}^{\frac{h-H}{60}} - 1\right)}.$$

式中：$B_1 = b((h+H)/2)$，t 为建筑外形锥度，h 为影响高度，即所求响应高度.

2.3　共振响应荷载分量

共振响应荷载分量由结构惯性产生，第一振型能量占绝大部分，因此单位高度 z 上共振响应值为

$$f_R(z) = g_R \rho_a C_d(z) b(z) m(z) \phi_1(z) \sqrt{\frac{\omega_1 S_u(\omega_1)}{8 M_1^{*2} \xi_1}}. \tag{5}$$

式中：g_R 为共振峰值系数，$m(z)$ 为高度为 z 处建筑物质量线密度，S_u 为风速谱，ω_1 是一阶圆频率，$[\phi]_1$ 为一阶振型，M_1^* 是第 1 阶结构的广义质量，表达式为 $M_1^* = [\phi]_1^{\mathrm{T}}[M][\phi]_1$.

等效静力风荷载为

$$f(z) = \bar{f} + \sqrt{f_B^2 + f_R^2}. \tag{6}$$

由以上 3 种分量的表达式可知，除了共振响应的荷载分量与结构特性相关外，其他分量均与结构动力特性无关.

3　相关分析参数

为了有效表示重力对计算产生的影响，采用风重耦合效应调整系数表示

$$\xi_w = \frac{W_g - W_0}{W_0}. \tag{7}$$

式中：W 为物理量，可以是频率、风振系数、弯矩、位移等，W_g 表示考虑风重耦合效应的物理量，W_0 为不考虑重力因素的物理量.

在结构设计中还要考虑每层的剪切刚度和弯曲刚度对结构的影响，这里引入弯曲刚度与剪切刚度比 κ（以下简称弯剪比），其定义为

$$\kappa = K_b/(K_s H^3). \tag{8}$$

此外重刚比也是反映高层结构特性一个重要参数，其代表了高耸结构物稳定性，对于上下均匀的结构可定义为结构的总重和高度平方的乘积与弯曲刚度之比

$$\chi = GH^2/K_b. \tag{9}$$

式中：G 为结构的总重，K_b 为结构的弯曲刚度.

利用式(2)～(6)可对任意形状的高层建筑进行等效风荷载重力耦合计算. 为了有效分析主要参数影响，参数计算以一栋高 180 m，60 层建筑为例，每个楼层的质量中心与弯曲刚度中心重合，具体计算参数见表 1，以下计算参数变化均以此为基点.

表 1　结构参数

层高/m	弯曲刚度/(N·m²)	剪切刚度/(N·m⁻¹)	楼层面积/m²	楼层代表质量/(kg·m⁻²)
3	$1.083\,3\times10^{13}$	5.2×10^{11}	400	500

4　风重耦合效应对结构自振频率的影响

根据前面分析，等效静力风荷载3个分量中，共振响应荷载分量是由惯性力产生的，与结构的动力特性相关，而重力耦合效应直接影响到结构的自振频率. 设不考虑重力耦合作用的结构第一振型角频率为 ω_0，用瑞利法可以得到

$$\omega_0^2 = \frac{\int_0^H K_b (u'')^2 \mathrm{d}y}{\int_0^H m(u)^2 \mathrm{d}y}.$$

考虑重力耦合作用后，结构最大势能为

$$U_{\max} = \frac{1}{2}\int_0^H K_b (u'')^2 \mathrm{d}y - \frac{1}{2}\int_0^H \rho A g \int_0^y (u')^2 \mathrm{d}y\mathrm{d}y,$$

结构体系最大动能为

$$T_{\max} = \frac{1}{2}\omega^2 \int_0^H m(u)^2 \mathrm{d}y.$$

由此可得考虑风重耦合效应后结构的基频为

$$\omega^2 = \omega_0^2\left(1 - \frac{\int_0^H \rho A g \int_0^y (u')^2 \mathrm{d}y\mathrm{d}y}{\int_0^H K_b (u'')^2 \mathrm{d}y}\right).$$

采用规范假设的高层结构振型曲线，积分计算后可得

$$\omega^2 = \omega_0^2\left(1 - \frac{1}{8}\frac{GH^2}{K_b}\right).$$

若取真实均匀结构的振型，可以算得

$$\omega^2 = \omega_0^2\left(1 - 0.1827\frac{GH^2}{K_b}\right),$$

公式可以统一写成

$$\omega^2 = \omega_0^2\left(1 - \beta\frac{GH^2}{K_b}\right). \tag{10}$$

式中 β 为 0.1～0.2 之间的系数，与结构形状有关.

利用能量法也可以得到第二、三、四阶的表达式,由于较为繁琐,不再列出. 下面采用数值计算进行验证:可以直接求解式(1)的解特征方程得到频率和振型,图 2 是如前所述一栋 180 m 高上下均匀的高层建筑,弯曲刚度发生变化时得到不同的重刚比,从图中可以看出第一频率调整系数减小符合式(10)线性变化规律,同时可以看到第二阶频率比和第三阶频率比的斜率要小于第一频率比,并且变化十分小,对高阶频率这种变化可以忽略不计.

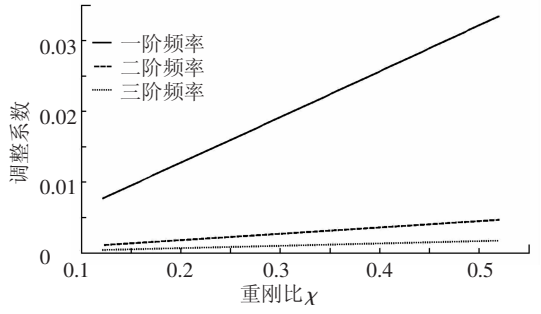

图 2 不同刚度比下结构频率的变化

图 3 是考察建筑形体在两个方向上线性收缩对高耸结构频率变化情况. 可以看出随着形体变化,结构弯曲刚度、剪切刚度、受风面积以及楼面重量相应发生变化. 竖向形状往上收缩率越大结构的基频调整系数就越小,第二、第三频率调整系数呈增大趋势,但幅度不大. 由于建筑体型变化后高阶振型有所变化,因此呈现基频和其他阶频率变化不一致. 但从工程上来说由于变化不到 1%,可以忽略不计.

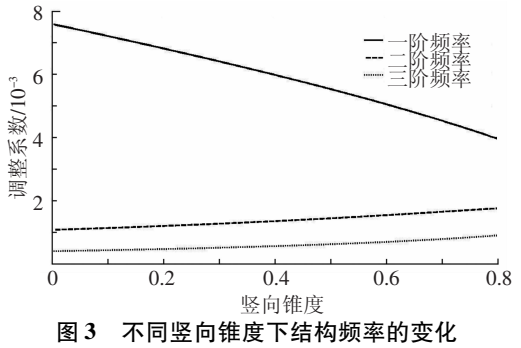

图 3 不同竖向锥度下结构频率的变化

5 重力耦合效应对现行荷载规范风振系数的影响

早在 60 年代,Davenport[12] 就提出风振系数的概念,不少国家规范中也将风振系数作为确定风荷载的重要参数[13-15]. 在我国荷载规范[16]中,结构由于振动产生惯性力用风振系数来表示,其表达式为

$$\beta(z) = \frac{\hat{f}(z)}{\bar{f}(z)} = 1 + \frac{g_R\omega_1^2\,\sigma_y\phi(z)}{\bar{f}(z)}. \quad (11)$$

式中:$\boldsymbol{\Phi}(z)$ 为结构的第一振型,ω_1 为结构的基频,σ_y 为一阶位移根方差. 式(10)平均荷载可由式(3)算得. 以表 1 参数作为算例,结果见图 4. 可以看到考虑风重耦合效应的结构风振调整系数比不考虑的要小,但两者之间差别很小,不到 1%,这是因为考虑风重耦合效应的结构刚度变小,结构基频变小,从而引起风振系数减少. 从图 4 还可看到随着高度增加,两种情况下的数据差别绝对值增加,但逐渐趋于稳定.

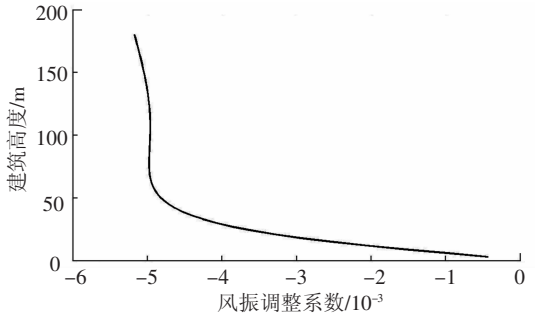

图 4 高度方向重力效应风振调整系数

6 等效静力风荷载作用下重力耦合效应对响应值影响

考虑风重耦合效应后,等效静力风荷载发生变化,更主要的是结构在风荷载和重力荷载共同作用下引起结构响应的增大,这里通过几个主要参数变化对结构顶端位移和底部弯矩的影响计算,分析重力耦合效应的大小,以便在结构设计中加以考虑.

6.1 重刚比的影响

重刚比是高层结构设计中的一个重要参数,将表 1 参数中的弯曲刚度进行变化,结果见图 5. 可以看出随着重刚比的增大,底部弯矩和顶端位移调整系数都呈线性增大趋势,这是由于楼层重力增大或者弯曲刚度减少都会直接导致结构响应增大,一般超高层建筑的重刚比较普通高层建筑大,重力的影响因素就不能忽略. 从图 5 可以看到,重力影响系数与重刚比基本成正线性关系,并且顶部位移调整系数增长快于底部弯矩.

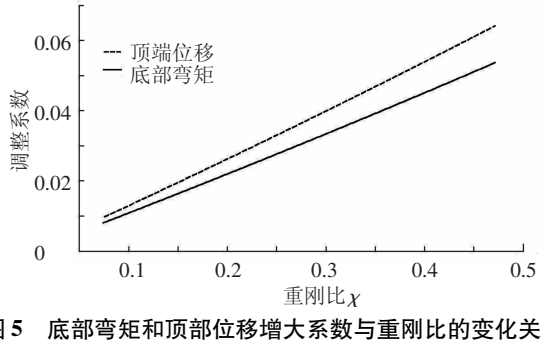

图 5 底部弯矩和顶部位移增大系数与重刚比的变化关系

6.2 弯剪比的影响

一般结构的楼层间存在着剪切变形和弯曲变

形，这里将弯剪比作为一个参数，来计算这个参数对重力耦合效应的影响，计算结果见图 6. 很明显，随着弯剪比增大，剪切变形逐渐增大，弯曲变形逐渐减少，而整体变形呈增大趋势，因此结构响应由于重力影响而增大. 同时图 6 反映出底部弯矩调整系数对弯剪比变化相对敏感，而顶部位移调整系数虽然也呈增大趋势，但这种变化非常小，可以忽略不计.

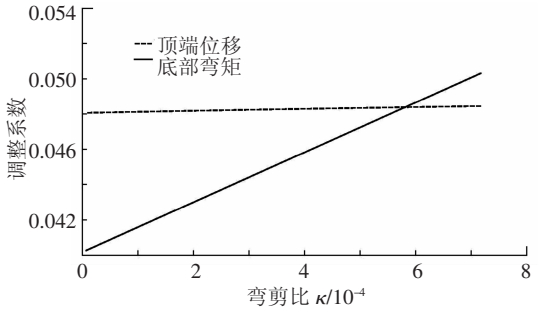

图 6　底部弯矩和顶部位移增大系数与弯剪比的变化关系

6.3　形体竖向锥度的影响

高层建筑体型均匀的不多，体型是从下往上收缩，在一般情况下由于受风面积减少，结构响应会减少；同时上部结构由于刚度削弱，使响应增大，最后要看这两种因素哪个影响大. 在这个算例中，结构的刚度、质量等随着高度增加而减小. 从图 7 可以看出，底部弯矩和顶部位移增大系数都随着竖向锥度增大而减少.

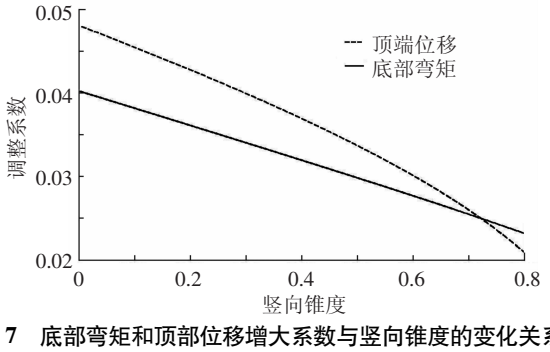

图 7　底部弯矩和顶部位移增大系数与竖向锥度的变化关系

7　结　论

1）风重耦合效应对结构的动力特性带来的影响主要是自振频率减小，尤其是基频的变化较为明显. 自振频率的调整系数与重刚比、弯剪比和竖向锥度直接相关.

2）在一般结构的刚度范围内，风重耦合效应对等效静力荷载的共振分量部分有影响，其值小于不考虑重力因素时的等效静力荷载，因此不考虑风重耦合效应的等效静力风荷载设计偏安全. 对于规范给出的风振系数亦有此结论.

3）结构响应值大小与结构的重刚比、弯剪比和竖向锥度有关. 当重刚比、弯剪比及竖向形体收缩率趋于较大时，风重耦合效应表现明显，不能忽略；此外当建筑的体型以及结构参数在竖向变化复杂时，特别是结构楼层重心、刚心以及形心不一致时，也会增大重力效应. 建议在这些情况下进行风重耦合计算以确保结构的安全性.

参考文献：

[1] NIXON D, BEAULIEU D, ADAMS P F. Simplified second-order frame analysis[J]. Canadan Journal of Civil Engineering, 1975, 2(4):602 – 605.

[2] WILSON E L, EERI M, HABIBULLAH A. Static and dynamic analysis of multi-Story buildings, including $P-\Delta$ effects[J]. Earthquake Spectra, 1987, 3(2): 289 – 298.

[3] 包世华，龚耀清. 超高层建筑空间巨型框架的水平力和重力二级效应分析的新方法[J]. 计算力学学报，2010, 27(1):40 – 46.

[4] 张明，沈蒲生，孟焕陵，等. 考虑轴压力影响时框架稳定性的刚重比控制方法[J]. 湖南大学学报：自然科学版，2007, 34(12):6 – 10.

[5] JGJ99—98 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. 北京：中国建筑技术研究院，1998.

[6] GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京：中国建筑科学研究院，2010.

[7] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京：中国建筑科学研究院，2010.

[8] JGJ3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京：中国建筑科学研究院，2010.

[9] KASPERSKI M, NIEMANN H J. The LRC (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.

[10] 叶丰，顾明. 高层建筑顺风向背景响应及其等效风荷载的计算方法[J]. 建筑结构学报，2002, 23(1): 58 – 63.

[11] 叶丰，顾明. 估算高层建筑结构顺风向等效风荷载和响应简化方法[J]. 工程力学，2003, 20(1):93 – 98.

[12] DAVENPORT A G. Gust loading factors[J]. Journal of Structure Division(ASCE), 1967, 93(ST3):11 – 34.

[13] ASCE/SEI 7—10 Minimum design loads for building and other structures[S]. Reston: ASCE, 2010.

[14] DD ENV 1991—1:1996 Basis of design and actions on structures[S]. Delft: IABSE, 1996.

[15] AS 1170.2—1989 SAA loading code[S]. Homebush: Standards Association of Australia, 1989.

[16] GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京：中国建筑科学研究院，2001.

（编辑　赵丽莹）