文章编号:1674-2974(2024)11-0065-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024108

非均匀质量高层结构风振基底剪力计算研究

周云[1],周和鸿[1†],吴玖荣[2]
(1. 广州大学 土木与交通工程学院,广东 广州 510006;
2. 广州大学 风工程与工程振动研究中心,广东 广州 510006)

摘 要:针对荷载规范中顺风向等效静力风荷载计算公式难以准确评估非均匀质量的高层结构基底剪力,提出竖向空间相关性折算系数η_z和质量转换系数m_{cn},分别考虑了多自由度体系与无限自由度体系两者竖向空间相关性的差异和质量非均匀分布对基底剪力的影响,对规范方法进行改进,结合两个算例进行验证;同时分析振型系数、建筑高度和地貌类型对η_z的影响.研究表明:竖向空间相关性折算系数η_z能反映多自由度体系与无限自由度体系两者竖向空间相关性的差异对基底剪力的影响,算例考虑该影响与否的误差分别为1.2%和2.8%;质量转换系数m_{cn}能反映质量非均匀分布对基底剪力的影响,算例考虑该影响与否的误差为小于5%和等于28.5%;两系数结合规范方法可准确计算非均匀质量高层结构风振基底剪力.η_z随着地面粗糙度增加和建筑高度增加而增大,随着指数型振型系数的指数增大而减小;η_z参数分析的最小值为0.922,误差可达5%以上;当设计不考虑多自由度体系和无限自由度体系两者竖向空间相关性的差异对基底剪力的影响时,按多自由度体系计算是偏于安全的.针对不同工程,质量转换系数m_{cn}取值需根据具体楼层质量与振型系数计算确定.

关键词:高层建筑;荷载规范;基底剪力;竖向空间相关性折算系数;质量转换系数
中图分类号:TU355 **文献标志码**:A

Study on Calculation of Wind-induced Base Shear Force of Non-uniform Mass Tall Buildings

ZHOU Yun[1], ZHOU Hehong[1†], WU Jiurong[2]
(1. School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;
2. Research Center for Wind Engineering and Engineering Vibration, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: As it is difficult to accurately evaluate the base shear force of a tall building with non-uniform mass under the equivalent static wind pressure calculated according to the load code, the vertical spatial correlation conversion coefficient η_z and mass conversion coefficient m_{cn} are proposed to consider the effects of the difference in vertical spatial correlation between multi-degree-of-freedom and infinite-degree-of-freedom systems and non-uniform mass distribution on the base shear forces, respectively, modifying the Chinese load code method in the calculation of the wind-induced base shear forces of non-uniform mass high-rise structures. Moreover, it is validated through two example analysis, respectively. The effects of the vibration mode coefficient, building height,

* **收稿日期**:2023-12-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378497),National Natural Science Foundation of China(52378497)
作者简介:周云(1965—),男,云南泸西人,广州大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: 1435276570@qq.com

and geomorphology on the vertical spatial correlation conversion coefficient η_z are analyzed in terms of parameters. The results show that the vertical spatial correlation conversion coefficient η_z can reflect the effect of the difference in vertical spatial correlation between multi-degree-of-freedom and infinite-degree-of-freedom systems, and the errors in the case study considering this effect or not are 1.2% or 2.8%, respectively; the errors in the case study considering non-uniform mass or not are less than 5% or 28.5% respectively, which indicates that the mass conversion coefficient m_{cn} can reflect the effects of the mass non-uniform distribution on the base shear forces; and the combination of two coefficients with the load code method can accurately calculate the wind-induced base shear forces of high-rise structures with non-uniform mass. The vertical spatial correlation conversion coefficient increases with the increase of ground roughness and building height, and decreases with the exponential increase of the exponential vibration mode coefficients; the minimum value of η_z in parameter analysis is 0.922, and the error can be more than 5%; without consideration of the effect of the difference in vertical spatial correlation between multi-degree-of-freedom and infinite-degree-of-freedom systems on the base shear forces, the calculation is more conservative based on multi-degree-of-freedom system. For different projects, the value of the mass conversion coefficient m_{cn} should be calculated based on each mass and vibration mode coefficient specifically.

Key words: tall buildings; load code; base shear force; vertical spatial correlation conversion coefficient; mass conversion coefficient

等效静力风荷载是联系抗风研究与抗风设计的桥梁,最早由 Davenport[1]在 1967 年提出的阵风荷载因子法(GLF 法)计算得到,该方法被许多国家(如美国、加拿大及澳大利亚等)采用. 我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)[2](简称荷载规范)采用惯性风荷载法(IWL 法)计算顺风向等效静力风荷载,脉动风的等效静力风荷载为背景响应分量和共振响应分量两部分对应的惯性力之和. 总等效静力风荷载等于平均风荷载加上脉动风引起的惯性力,最终可表示为风振系数乘以平均风荷载.

基底剪力可反映等效静力风荷载的最大误差[3]. 顺风向基底剪力采用荷载规范等效静力风荷载公式计算,其为假定结构质量沿高度均匀分布的 IWL 法简化的计算公式(简称规范方法),可准确评估均匀质量的高层结构基底剪力,但未给出质量沿高度非均匀分布的高层结构风振基底剪力计算公式和相关建议,难以准确评估非均匀质量的高层结构基底剪力[4-6],而实际工程中存在很多质量沿高度非均匀分布[4,7-8]的高层结构. 其中非均匀质量指的是结构平面内质量分布均匀,而各楼层之间的质量沿竖向分布不均匀,忽略平面内质量非均匀分布导致的偏心影响. 一些学者采用时域法[4,7-8]或未简化的 IWL 法[9-10]等方法计算非均匀质量高层结构风振基底剪力,此类方法在设计中使用不便,且鲜有学者研究利用规范方法计算非均匀质量高层结构风振基底剪力. 计算非均匀质量且质量非线性变化的高层结构顺风向等效静力风荷载时,一般采用多自由度体系模型[7,11-15],而荷载规范采用无限自由度体系模型计算第 1 阶广义位移均方根. 两种体系对竖向空间相关性的考虑不同,因此一些学者[4, 6, 13-15]将按多自由度体系计算的高层结构风振基底剪力与规范方法结果直接进行对比是不准确的. 鉴于此,本文提出竖向空间相关性折算系数 η_z 和质量转换系数 m_{cn},分别考虑多自由度体系与无限自由度体系两者竖向空间相关性和质量非均匀分布对基底剪力的影响,以此改进规范方法针对非均匀质量高层结构风振基底剪力的计算,结合两个算例进行验证,并分析了相关参数对竖向空间相关性折算系数 η_z 的影响.

1 基本理论

1.1 无限自由度体系高层结构

本文仅考虑顺风向风荷载作用. 荷载规范采用 IWL 法按无限自由度体系计算高层结构等效静力风荷载,仅考虑第 1 阶振型响应,等效静力风荷载等于平均风荷载与脉动风引起的惯性力之和:

$$F_{D1}(z)=\bar{F}_{D1}(z)+\hat{F}_{D1}(z)=\beta(z)\cdot\bar{F}_{D1}(z) \tag{1}$$

其中风振系数$\beta(z)$为:

$$\beta(z)=1+\frac{\hat{F}_{D1}(z)}{\bar{F}_{D1}(z)} \tag{2}$$

$$\bar{F}_{D1}(z)=\mu_z(z)\cdot\mu_s\cdot w_0\cdot B \tag{3}$$

式中:μ_s、$\mu_z(z)$、B分别为z处质点的阻力系数、风压高度变化系数、迎风面风宽度;w_0为基本风压,即标准地貌(B类)地面10 m高处的风压.

假定结构为质量沿高度均匀分布的等截面结构,则任意高度z处脉动风荷载为:

$$\hat{F}_{D1}(z)=g\omega_1^2 m\phi(z)\sigma_{q1} \tag{4}$$

其中顺风向第1阶广义位移均方根σ_{q1}如式(5)所示.

$$\sigma_{q1(ID)}=\frac{2w_0I_{10}\mu_s}{\omega_1^2}\frac{\sqrt{\int_0^B\int_0^B coh_x(x_1,x_2)\mathrm{d}x_1\mathrm{d}x_2\int_0^H\int_0^H[\mu_z(z_1)\phi_1(z_1)\bar{I}_z(z_1)][\mu_z(z_2)\phi_1(z_2)\bar{I}_z(z_2)]coh_z(z_1,z_2)\mathrm{d}z_1\mathrm{d}z_2}}{m\int_0^H\phi_1^2(z)\mathrm{d}z}\sqrt{1+R^2} \tag{5}$$

式中:coh_x、coh_z分别为水平方向和竖直方向的相关函数,共振分量因子R为:

$$R=\sqrt{\frac{\pi}{6\xi_1}\frac{x_1^2}{(1+x_1^2)^{4/3}}},\ x_1=\frac{30f_1}{\sqrt{k_w w_0}} \tag{6}$$

式中:f_1、ξ_1、k_w分别为第1阶频率、第1阶阻尼比和地面粗糙度修正系数.

1.2　多自由度体系高层结构

对于多自由度体系模型的非均匀质量高层结构:

高度z_i处第i质点的平均风荷载为:

$$\bar{F}(z_i)=\mu_z(z_i)\cdot\mu_s\cdot w_0\cdot A_r(z_i) \tag{7}$$

高度z_i处第i质点的脉动风荷载为:

$$\hat{F}_{D1}(z_i)=g\omega_1^2 m(z_i)\phi(z_i)\sigma_{q1} \tag{8}$$

假定层高Δh相等,第1阶广义位移均方根σ_{q1}[16]如式(9)所示.

$$\sigma_{q1(MD)}=\frac{2w_0I_{10}\mu_s}{\omega_1^2}\frac{\sqrt{\int_0^B\int_0^B coh_x(x_1,x_2)\mathrm{d}x_1\mathrm{d}x_2}}{\sum_{i=1}^n m(z_i)\phi_1^2(z_i)}\Delta h\sqrt{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n[\mu_z(z_i)\phi_1(z_i)\bar{I}_z(z_i)][\mu_z(z_j)\phi_1(z_j)\bar{I}_z(z_j)]coh_z(z_i,z_j)}\sqrt{1+R^2} \tag{9}$$

1.3　竖向空间相关性折算系数

设计过程中使用PKPM、YJK或ETABS软件按规范方法采用多自由度体系计算高层结构等效静力风荷载时,假定每一层不同高度处风荷载标准值等于该层顶部处的风荷载标准值[12],振型采用动力计算的实振型,即先按规范方法计算无限自由度体系的第1阶广义位移均方根,后采用多自由度体系计算惯性风荷载.而多自由度体系和无限自由度体系对竖向空间相关性的考虑是不同的,本文基于基底剪力相等提出竖向空间相关性折算系数,以考虑两者竖向空间相关性的差异对基底剪力的影响.

为推导竖向空间相关性折算系数,假定高层结构质量均匀分布,即$m(z_i)=m\cdot\Delta h$.将$m(z_i)=m\cdot\Delta h$代入式(8)计算多自由度体系的均匀质量高层结构脉动风荷载,脉动基底剪力为:

$$\hat{F}_{B1}=\sum_{i=1}^n g\omega_1^2 m\cdot\Delta h\phi(z_i)\sigma_{q1}=g\omega_1^2 m\cdot\Delta h\sigma_{q1}\sum_{i=1}^n\phi(z_i) \tag{10}$$

按无限自由度体系计算第1阶广义位移均方根σ_{q1}的多自由度体系均匀质量高层结构的脉动基底剪力如式(11)所示.按多自由度体系计算第1阶广义位移均方根σ_{q1}的多自由度体系均匀质量高层结构的脉动基底剪力如式(12)所示.

$$\hat{F}_{B1,ID(un)}=2gw_0I_{10}\mu_s\Delta h\frac{\sum_{i=1}^n\phi(z_i)}{\int_0^H\phi_1^2(z)\mathrm{d}z}\sqrt{\int_0^B\int_0^B coh_x(x_1,x_2)\mathrm{d}x_1\mathrm{d}x_2\int_0^H\int_0^H[\mu_z(z_1)\phi_1(z_1)\bar{I}_z(z_1)][\mu_z(z_2)\phi_1(z_2)\bar{I}_z(z_2)]coh_z(z_1,z_2)\mathrm{d}z_1\mathrm{d}z_2}\sqrt{1+R^2} \tag{11}$$

$$\hat{F}_{B1,MD(un)}=2gw_0I_{10}\mu_s\Delta h\frac{\sum_{i=1}^n\phi(z_i)}{\sum_{i=1}^n\phi^2(z_i)}\sqrt{\int_0^B\int_0^B coh_x(x_1,x_2)\mathrm{d}x_1\mathrm{d}x_2}\sqrt{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n[\mu_z(z_i)\phi_1(z_i)\bar{I}_z(z_i)][\mu_z(z_j)\phi_1(z_j)\bar{I}_z(z_j)]coh_z(z_i,z_j)}\sqrt{1+R^2} \tag{12}$$

文献[17]采用不计空间相关性的位移根方差结果乘以折算系数来考虑空间相关性的结果,推导出空间相关性折算系数用于考虑不计空间相关性引起的误差.对于多自由度体系均匀质量高层结构的脉动基底剪力,按无限自由度体系计算第1阶广义位移均方根的脉动基底剪力乘以竖向空间相关性折算系数,即为按多自由度体系计算第1阶广义位移均方根的脉动基底剪力.实际上,按无限自由度体系计算第1阶广义位移均方根$\sigma_{q1(ID)}$乘以竖向空间相关性折算系数即为按多自由度体系计算第1阶广义位移均方根$\sigma_{q1(MD)}$.由此可得:

$$\hat{F}_{B1,MD(un)} = \eta_z \hat{F}_{B1,ID(un)} \tag{13}$$

其中竖向空间相关性折算系数η_z如式(14)所示.

与文献[17]不同,本文提出的竖向空间相关性折算系数η_z为按多自由度体系计算第1阶广义位移均方根$\sigma_{q1(MD)}$与按无限自由度体系计算第1阶广义位移均方根$\sigma_{q1(ID)}$的比值,用于反映多自由度体系与无限自由度体系竖向空间相关性的差异对第1阶广义位移均方根和脉动基底剪力的影响.

1.4 质量转换系数

多自由度体系的非均匀质量高层结构脉动基底剪力如式(15)所示.令$\sum_{i=1}^{n} m(z_i)\phi(z_i) = m_1 \sum_{i=1}^{n} \phi(z_i)$,$\sum_{i=1}^{n} m(z_i)\phi^2(z_i) = m_2 \sum_{i=1}^{n} \phi^2(z_i)$,$m_{cn}=m_1/m_2$,$m_{cn}$为将非均匀质量转化为均匀质量的质量转换系数,反映质量非均匀分布对基底剪力的影响,如式(16)所示.

$$\eta_z = \frac{1/\sum_{i=1}^{n}\phi^2(z_i) \times \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}[\mu_z(z_i)\phi_1(z_i)\bar{I}_z(z_i)][\mu_z(z_j)\phi_1(z_j)\bar{I}_z(z_j)]coh_z(z_i,z_j)}}{1/\int_0^H \phi_1^2(z)\mathrm{d}z \times \sqrt{\int_0^H\int_0^H [\mu_z(z_1)\phi_1(z_1)\bar{I}_z(z_1)][\mu_z(z_2)\phi_1(z_2)\bar{I}_z(z_2)]coh_z(z_1,z_2)\mathrm{d}z_1\mathrm{d}z_2}} \tag{14}$$

$$\hat{F}_{B1,MD(nun)} = 2gw_0 I_{10}\mu_s \Delta h \frac{\sum_{i=1}^{n} m(z_i)\phi(z_i)}{\sum_{i=1}^{n} m(z_i)\phi^2(z_i)} \sqrt{\int_0^B\int_0^B coh_x(x_1,x_2)\mathrm{d}x_1\mathrm{d}x_2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}[\mu_z(z_i)\phi_1(z_i)\bar{I}_z(z_i)][\mu_z(z_j)\phi_1(z_j)\bar{I}_z(z_j)]coh_z(z_i,z_j)} \sqrt{1+R^2} \tag{15}$$

$$m_{cn} = \frac{m_1}{m_2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m(z_i)\phi(z_i) \Big/ \sum_{i=1}^{n}\phi(z_i)}{\sum_{i=1}^{n} m(z_i)\phi^2(z_i) \Big/ \sum_{i=1}^{n}\phi^2(z_i)} \tag{16}$$

则式(15)可用下式表示:

$$\hat{F}_{B1,MD(nun)} = m_{cn} \times \hat{F}_{B1,MD(un)} \tag{17}$$

由式(17)可知,多自由度体系的非均匀质量高层结构脉动基底剪力可转化为均匀质量高层结构(除质量分布不同外,第1阶振型、阻尼比等其他动力参数均一致)脉动基底剪力与质量转换系数的乘积.而多自由度体系的均匀质量高层结构脉动基底剪力可利用无限自由度体系计算第1阶广义位移均方根σ_{q1}的多自由度体系均匀质量高层结构的脉动基底剪力乘以竖向空间相关性折算系数计算,其中后者脉动基底剪力可按规范方法计算.文献[2,18-19]指出,考虑迎风面和背风面的风压相关性,背景分量因子乘以折减系数0.7;而此时,按规范方法计算无限自由度体系均匀质量高层结构的脉动基底剪力为$\hat{F}_{B1,ID(un)_0}$.综上,不考虑迎风面和背风面的风压相关性时,采用竖向空间相关性折算系数η_z和质量转换系数m_{cn}结合规范方法计算多自由度体系非均匀质量高层结构风振基底剪力的步骤如图1所示.

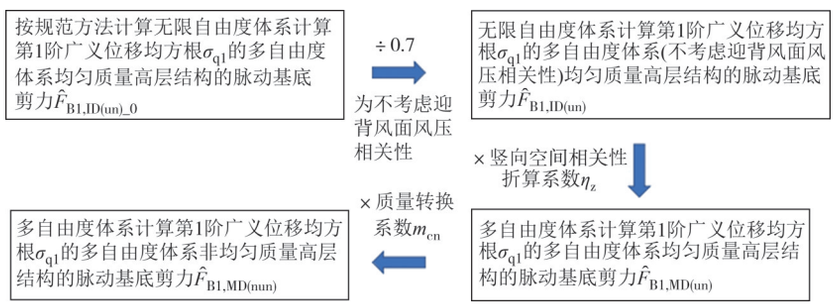


图1 规范方法计算非均匀质量高层结构风振基底剪力

Fig.1 Calculation of wind-induced base shear force of non-uniform mass high-rise structures based load code method

2　算例验证

为验证竖向空间相关性折算系数η_z和质量转换系数m_{cn}改进规范方法计算多自由度体系非均匀质量高层结构风振基底剪力的准确性. 首先,以一多自由度体系均匀质量的高层结构为例,验证竖向空间相关性折算系数η_z的准确性;接着利用一多自由度体系非均匀质量高层结构算例,验证竖向空间相关性折算系数η_z和质量转换系数m_{cn}结合规范方法,计算多自由度体系非均匀质量高层结构风振基底剪力的准确性. 同时,用IWL法验证结果准确性. 本文所有计算均在MATLAB平台上编程实现.

2.1　算例1——多自由度体系均匀质量的高层结构

以一典型11层的均匀质量高层结构层剪切模型为算例1,验证竖向空间相关性折算系数η_z的准确性. 每层结构平面为$B\times D$=30 m×30 m,H=39.6 m,结构层高Δh为3.6 m,密度为192 kg/m^3,每一层的质量$[m(z_i)=m\cdot\Delta h]$为622 080 kg,50年重现期风压为w_0=0.35 kN/m^2,地貌类别为B类,风荷载体型系数为1.3. x、y向第1阶频率均为f_1=1.247 Hz,并假设x、y方向第1振型均为线性,即$\hat{\phi}_{1,j}=z_i/H$,则结构各层刚度计算如下[20]:

$$k_i=\frac{\omega_1^2\sum_{j=i}^{N}m_j\phi_{1,j}}{\phi_{1,i}-\phi_{1,i-1}} \tag{18}$$

由此得到结构的前3阶频率分别为1.247、3.055、4.830,假定结构的第1阶阻尼比为5%. 规范方法计算多自由度体系均匀质量高层结构的基底剪力平均分量和最值分别为$\bar{F}_{M,MD(un)}$和$F_{B,MD(un)_max}$. 计算得到竖向空间相关性折算系数η_z为0.961 3. 采用规范方法、IWL法计算得到算例1的风振基底剪力见表1,均取峰值因子g=2.5. 由表1可知,不考虑多自由度体系与无限自由度体系两者竖向空间相关性差异时,规范方法计算脉动基底剪力$\hat{F}_{B1,ID(un)}$为IWL法的102.8%,误差为2.8%;考虑该差异时,规范方法计算脉动基底剪力$\hat{F}_{B1,MD(un)}$为IWL法的98.8%,误差为1.2%,误差减小了. 因此,采用竖向空间相关性折算系数η_z可反映多自由度体系与无限自由度体系两者竖向空间相关性差异对1阶广义位移均方根和基底剪力的影响.

表1　算例1的基底剪力

Tab.1　Base shear force of example 1

类别	$\hat{F}_{M,MD(un)}$	规范方法			IWL法	
		$\hat{F}_{B1,ID(un)_0}$	$\hat{F}_{B1,ID(un)}$	$\hat{F}_{B1,MD(un)}$	$\hat{F}_{B1,MD(un)}$	$F_{B,MD(un)_max}$
数值/kN	672.592	265.096	378.709	364.047	368.549	1 041.142
与IWL法结果比值	—	0.719	1.028	0.988	1	—

2.2　算例2——多自由度体系非均匀质量的高层结构

以与算例1结构平面、层高、高度和风荷载等条件相同的非均匀质量高层结构为算例2,验证竖向空间相关性折算系数η_z和质量转换系数m_{cn}结合规范方法,计算多自由度体系非均匀质量高层结构风振基底剪力的准确性. 结构各层的质量与剪切刚度见表2,第1阶振型如图2所示,由图2可知算例2的第1阶振型位移可用$\phi=(z/H)^{1.1}$近似表示.

计算得到竖向空间相关性折算系数η_z为0.971 3,质量转换系数m_{cn}为1.335,规范方法计算多自由度体系非均匀质量高层结构的基底剪力平均分量和最值分别为$\bar{F}_{M,MD(nun)}$和$F_{B,MD(nun)_max}$,规范方法和IWL法计算算例2的基底剪力见表3. 由表3可知,不考虑质量非均匀分布时,规范方法计算脉动基底剪力$\hat{F}_{B1,MD(un)}$为IWL法的72.5%,误差为28.5%,低估了非均匀质量对基底剪力的影响;采用质量转换系数m_{cn}

表2　算例2结构质量与刚度

Tab.2　Mass and stiffness of example 2

层号	质量/kg	层刚度/(kN·m^{-1})
11	89 440	69 445
10	178 880	169 445
9	318 400	455 111
8	560 000	655 111
7	457 920	855 111
6	658 000	1 455 111
5	844 120	2 304 000
4	1 030 320	2 304 000
3	1 030 320	2 304 000
2	1 030 320	2 304 000
1	1 030 320	2 304 000

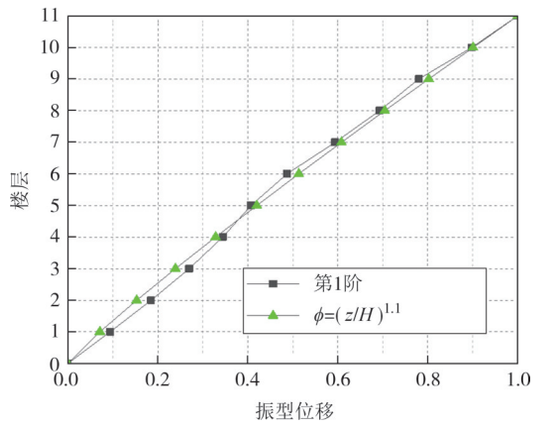


图2 算例2第1阶振型位移

Fig.2 The modal displacement of example 2

考虑质量非均匀分布的影响时,规范方法计算脉动基底剪力 $\hat{F}_{\mathrm{B1,MD(nun)}}$ 为IWL法的96.7%,误差在5%以内,两者基本一致.因此,采用质量转换系数 m_{cn} 可考虑质量非均匀分布对基底剪力的影响,也即竖向空间相关性折算系数 η_z 和质量转换系数 m_{cn} 结合规范方法可准确计算非均匀质量高层结构风振基底剪力,视其为可采用现有荷载规范计算基底剪力的一种简化实用计算方法.同理,非均匀质量高层结构第 i 质点脉动风荷载可用下式表示:

$$\hat{F}_{i,\mathrm{MD(nun)}}=\frac{m(z_i)}{m_2}\hat{F}_{i,\mathrm{MD(un)}} \tag{19}$$

式中:$\hat{F}_{i,\mathrm{MD(nun)}}$、$\hat{F}_{i,\mathrm{MD(un)}}$ 分别为非均匀和均匀质量高层结构第 i 质点脉动风荷载.即非均匀质量高层结构脉动风荷载可按照质量均匀分布考虑,再乘以 $m(z_i)/m_2$,为采用现有荷载规范计算基底弯矩提供了一种简化实用计算方法.

表3 算例2的基底剪力

Tab.3 Base shear force of example 2

类别	$\hat{F}_{\mathrm{M,MD(nun)}}$	规范方法				IWL法	
		$\hat{F}_{\mathrm{B1,ID(un)_0}}$	$\hat{F}_{\mathrm{B1,ID(un)}}$	$\hat{F}_{\mathrm{B1,MD(un)}}$	$\hat{F}_{\mathrm{B1,MD(nun)}}$	$\hat{F}_{\mathrm{B1,MD(nun)}}$	$F_{\mathrm{B,MD(nun)_max}}$
数值/kN	672.592	250.033	357.190	346.939	463.158	478.861	1 151.453
与IWL法结果比值	—	0.522	0.746	0.725	0.967	1	—

3 竖向空间相关性折算系数 η_z 参数分析

按式(14)计算竖向空间相关性折算系数 η_z 受到振型系数 ϕ、建筑高度 H、地貌类型的影响,且需对振型系数进行拟合和积分计算,不方便设计直接使用.因此本文对以上影响参数进行分析,给出竖向空间相关性折算系数 η_z 取值建议,供设计人员参考.

我国荷载规范规定高层建筑以剪力墙为主的基本振型按弯剪型考虑,振型系数的表达式为:

$$\phi_1(z)=\tan\left[\frac{\pi}{4}\left(\frac{z}{H}\right)^{0.7}\right] \tag{20}$$

高耸结构基本振型按弯曲型考虑,振型系数的表达式为:

$$\phi_1(z)=\frac{6z^2H^2-4z^3H+z^4}{3H^4} \tag{21}$$

规范[21-22]使用以下指数型振型系数:

$$\phi_1(z)=(z/H)^{\gamma} \tag{22}$$

式中:γ 为振型指数,取值范围为0.5~1.5.

本文对振型系数 ϕ、建筑高度 H、地貌类型对竖向空间相关性折算系数 η_z 的影响进行参数分析时,振型系数 ϕ 取值按式(20)~式(21),式(22)中 γ 分别为0.5、0.8、1.0、1.2、1.5,建筑高度 H 为40~200 m且以20 m为间隔递增,层高5 m,地貌分别为A、B、C、D四类.竖向空间相关性折算系数 η_z 参数分析结果见表4,由表4可知,随着地面粗糙度指数 α(A→D类地貌)增加,竖向空间相关性折算系数 η_z 增大;层高为定值,随着建筑高度增加,竖向空间相关性折算系数 η_z 增大;式(20)振型系数的结果与指数型振型系数 γ=1的结果相近,式(21)振型系数的结果介于指数型振型系数 γ=1.2与 γ=1.5的结果之间,竖向空间相关性折算系数 η_z 随着指数型振型系数的指数 γ 增大而减小.表4中竖向空间相关性折算系数 η_z 的最小值为0.922,误差可达5%以上.当不考虑多自由度体系和无限自由度体系两者竖向空间相关性之间的差异对风振基底剪力的影响时,按多自由度体系计算是偏于安全的.根据表4拟合出不同振型、地貌类型对应的竖向空间相关性折算系数 η_z 的计算表达式,本文仅给出式(20)振型、B类地貌的竖向空间相关性折算系数 η_z 的计算表达式,如式(23)所示.

$$\eta_z=0.873H^{0.0237} \tag{23}$$

表4　竖向空间相关性折算系数η_z的参数分析

Tab.4　Parameter analysis of vertical spatial correlation conversion coefficient η_z

地貌类型	高度H/m	振型系数表达式						
		式(20)	式(21)	γ=0.5	γ=0.8	γ=1.0	γ=1.2	γ=1.5
A	40	0.946	0.928	0.970	0.956	0.946	0.937	0.922
	60	0.962	0.949	0.979	0.969	0.962	0.955	0.945
	80	0.971	0.960	0.983	0.976	0.971	0.965	0.957
	100	0.976	0.967	0.986	0.980	0.976	0.971	0.965
	120	0.979	0.972	0.988	0.983	0.979	0.975	0.970
	140	0.982	0.975	0.989	0.985	0.982	0.979	0.974
	160	0.984	0.978	0.990	0.986	0.984	0.981	0.977
	180	0.985	0.980	0.991	0.988	0.985	0.983	0.979
	200	0.987	0.982	0.992	0.989	0.987	0.984	0.981
B	40	0.948	0.929	0.972	0.958	0.948	0.939	0.924
	60	0.964	0.950	0.980	0.970	0.964	0.957	0.946
	80	0.972	0.961	0.985	0.977	0.971	0.966	0.958
	100	0.977	0.968	0.987	0.981	0.976	0.972	0.965
	120	0.980	0.972	0.989	0.983	0.980	0.976	0.971
	140	0.983	0.976	0.990	0.985	0.982	0.979	0.974
	160	0.984	0.978	0.991	0.987	0.984	0.981	0.977
	180	0.986	0.981	0.992	0.988	0.986	0.983	0.979
	200	0.987	0.982	0.992	0.989	0.987	0.985	0.981
C	40	0.953	0.933	0.978	0.962	0.953	0.943	0.928
	60	0.967	0.952	0.984	0.973	0.966	0.959	0.949
	80	0.974	0.963	0.987	0.979	0.974	0.968	0.960
	100	0.979	0.969	0.989	0.983	0.978	0.974	0.967
	120	0.982	0.974	0.991	0.985	0.981	0.978	0.972
	140	0.984	0.977	0.992	0.987	0.984	0.980	0.976
	160	0.986	0.980	0.992	0.988	0.985	0.982	0.978
	180	0.987	0.982	0.993	0.989	0.987	0.984	0.980
	200	0.988	0.983	0.993	0.990	0.988	0.986	0.982
D	40	0.958	0.937	0.984	0.968	0.957	0.947	0.932
	60	0.970	0.955	0.988	0.977	0.970	0.963	0.952
	80	0.977	0.965	0.990	0.982	0.976	0.971	0.963
	100	0.981	0.971	0.991	0.985	0.980	0.976	0.969
	120	0.984	0.974	0.992	0.987	0.983	0.979	0.974
	140	0.986	0.977	0.993	0.988	0.985	0.982	0.977
	160	0.987	0.980	0.994	0.989	0.987	0.984	0.980
	180	0.988	0.982	0.994	0.990	0.988	0.985	0.982
	200	0.989	0.983	0.995	0.991	0.989	0.987	0.983

4　结 论

针对荷载规范中顺风向等效静力风荷载计算公式难以准确评估非均匀质量的高层结构基底剪力,本文提出竖向空间相关性折算系数η_z和质量转换系数m_{cn}分别考虑多自由度体系与无限自由度体系两者竖向空间相关性的差异和质量非均匀分布对基底剪力的影响,对规范方法计算非均匀质量高层结构风振基底剪力进行改进,通过两个算例进行验证;并对振型系数、建筑高度、地貌类型对竖向空间相关性折算系数的影响进行参数分析,得到以下结论:

1)竖向空间相关性折算系数η_z可反映多自由度体系与无限自由度体系两者竖向空间相关性差异对

基底剪力的影响,算例考虑该影响与否的误差分别为1.2%和2.8%;质量转换系数m_{cn}可反映质量非均匀分布对基底剪力的影响,算例考虑该影响与否的误差为小于5%和28.5%.证明采用竖向空间相关性折算系数η_z和质量转换系数m_{cn}结合规范方法可准确计算非均匀质量高层结构风振基底剪力.

2)竖向空间相关性折算系数η_z随着地面粗糙度指数增大和建筑高度增加而增大,随着指数型振型系数的指数γ增大而减小;竖向空间相关性折算系数η_z参数分析的最小值为0.922,误差可达5%以上;当设计不考虑多自由度体系和无限自由度体系两者竖向空间相关性之间的差异对风振基底剪力的影响时,按多自由度体系计算是偏于安全的.针对不同工程,质量转换系数m_{cn}取值需根据具体楼层质量和振型系数计算确定.

参考文献

[1] DAVENPORT A G. Gust loading factors[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1967, 93(3): 11-34.

[2] 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 structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

[3] 熊铁华,梁枢果. 规范方法计算高层结构风振底部剪力的精确度研究[J]. 振动工程学报,2011,24(6):664-669.
XIONG T H, LIANG S G. Accuracy of base shear force of tall building wind-induced vibration response produced by Chinese load code[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(6): 664-669. (in Chinese)

[4] 王钦华,张乐乐,喻莹,等. 典型截面超高层建筑风洞试验与荷载规范计算的等效静力风荷载比较分析[J]. 建筑结构, 2015, 45(2): 70-74.
WANG Q H, ZHANG L L, YU Y, et al. Comparison and analysis on equivalent static wind load of typical cross-section of super-tall building from the perspectives of wind tunnel test and load code results[J]. Building Structure, 2015, 45(2): 70-74. (in Chinese)

[5] 刘香,尹艳杰. 锥筒型塔架风振响应分析及风振系数研究[J]. 钢结构, 2015, 30(6): 51-54.
LIU X, YIN Y J. Analysis and research of wind vibration response and wind vibration coefficient for cone tower[J]. Steel Construction, 2015, 30(6): 51-54. (in Chinese)

[6] 谭佳俊,谭平,吴玖荣,等. 某百米级高层隔震结构风致效应研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(2): 97-104.
TAN J J, TAN P, WU J R, et al. Study on wind-induced effect of a 100 m level seismically isolated high-rise structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(2): 97-104. (in Chinese)

[7] 阳露,赵若红,徐安. 超高层建筑风致振动的$P-\Delta$效应[J]. 建筑科学, 2016, 32(3): 7-13.
YANG L, ZHAO R H, XU A. $P-\Delta$ effects on wind-induced response of super-tall buildings[J]. Building Science, 2016, 32(3): 7-13. (in Chinese)

[8] 付伟庆,李茂,李通,等. 多阶梯被动变阻尼装置高层建筑风振控制性能化设计方法[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(5): 47-55.
FU W Q, LI M, LI T, et al. Performance-based design method for wind-induced vibration control of high-rise building with multi-stage passive variable damping device[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(5): 47-55. (in Chinese)

[9] 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)

[10] 卢春玲,李秋胜,黄生洪,等. 深圳平安国际金融大厦风致响应大涡模拟分析[J]. 建筑结构学报,2012,33(11):1-11.
LU C L, LI Q S, HUANG S H, et al. Large eddy simulation of wind induced response on the Shenzhen Pingan IFC Building[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(11): 1-11. (in Chinese)

[11] 沈国辉,王宁博,任涛,等. 建筑结构风致响应的时频域计算方法比较[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(9): 1573-1578.
SHEN G H, WANG N B, REN T, et al. Comparison of time domain and frequency domain methods to obtain wind-induced responses of civil engineering structures[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(9): 1573-1578. (in Chinese)

[12] 陈云. 不同结构分析软件中风荷载计算方法探讨[J]. 钢结构, 2016, 31(12): 112-116.
CHEN Y. Discussion on calculating methods of wind load in different structural analysis softwares[J]. Steel Construction, 2016, 31(12): 112-116. (in Chinese)

[13] 郭小飞. 超高层建筑结构风荷载数值模拟及风振响应研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学,2020.
GUO X F. Numerical simulation of wind load and wind vibration response of super high-rise buildings [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University,2020.(in Chinese)

[14] 胡涛. 单管塔风致响应研究及风荷载规范对比[D]. 天津: 天津大学,2019.
HU T. Study on wind-induced response of single-tube tower and comparison of wind load specifications [D]. Tianjin: Tianjin University,2019.(in Chinese)

[15] 贾亚乐. 高层建筑等效静力风荷载计算及数值模拟分析[D]. 邯郸:河北工程大学,2020.
JIA Y L. Calculation and numerical simulation of equivalent static wind load of high-rise building [D]. Handan: Hebei University of Engineering,2020.(in Chinese)

[16] LI Z H, HUANG G Q, CHEN X Z, et al. Wind-resistant design and equivalent static wind load of base-isolated tall building: a case study[J]. Engineering Structures,2020,212:110533.

[17] 张相庭. 高耸高层结构随机风振空间相关性及折算系数[J]. 同济大学学报,1982,10(2):29-38.
ZHANG X T. The spatial correlations and conversion factor of wind-excited random vibration for towers and tall buildings[J]. Journal of Tongji University,1982,10(2): 29-38.(in Chinese)

[18] 熊铁华. 新旧荷载规范中高耸结构的等效静力风荷载比较[J]. 武汉大学学报(工学版),2020,53(11):966-970.
XIONG T H. Comparison of equivalent static wind loads of high-rise structures between the new and old load codes [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(11): 966-970.(in Chinese)

[19] 李永贵,李秋胜. 基本振型对高层建筑等效静力风荷载的影响分析[J]. 地震工程与工程振动,2016,36(6):38-44.
LI Y G, LI Q S. Influence of fundamental mode shapes on equivalent static wind loads of tall buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2016,36(6):38-44.(in Chinese)

[20] ELLIS B R. An assessment of the accuracy of predicting the fundamental natural frequencies of buildings and the implications concerning the dynamic analysis of structures[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers,1980,69(3):763-776.

[21] Minimum design loads for building and other structure: ANSI/ASCE7-10 [S]. Reston Virginia: American Society of Civil Engineers,2010.

[22] Architectural Institute of Japan. AIJ recommendations for loads on buildings[S]. Tokyo:Architectural Institute of Japan,2004.