

文章编号: 1000-2073(2002)04-0051-06

# 土—结构相互作用对高层建筑风振舒适度的影响<sup>\*</sup>

陈 震<sup>1</sup>, 薛松涛<sup>1,2</sup>, 范存新<sup>1,3</sup>, 唐和生<sup>1</sup>

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 近畿大学 理工学部建筑学科, 日本, 大阪; 3. 苏州科技学院 城建系, 江苏 苏州 215011)

**摘 要:** 推导了脉动风荷载作用下考虑土—结构相互作用时高层建筑结构加速度响应的计算公式. 算例表明土—结构相互作用对高层建筑风振加速度响应有明显影响. 一般而言, 在软土地基上土—结构相互作用使高层建筑风振时加速度增加, 从而增加了人体的不舒适感, 甚至有可能影响到高层建筑的使用功能, 故在设计时应引起重视.

**关键词:** 土—结构相互作用; 高层建筑; 风振; 加速度响应; 舒适度

**中图分类号:** TV973.213 **文献标识码:** A

## 0 前言

由于土—结构相互作用(以下简称 SSI), 在脉动风荷载作用下, 高层建筑的总位移会大大超过刚性地基时的位移, 从而有可能使人体产生明显的不舒适感, 因此, 在高层建筑风振响应分析中, 应当考虑 SSI 的影响.

但是影响人体舒适度主要的是楼层的加速度响应<sup>[1,2]</sup>, 而不是位移响应. 位移大并不一定表示加速度大, 国外曾有人专门研究过高层建筑使用者不舒适度与引起这种不舒适的加速度之间的对应关系<sup>[3]</sup>, 文献<sup>[2]</sup>指出对于低于 1Hz 的振动, 当加速度达到 0.015g~0.05g 时, 人就会感到不适; 当加速度达到 0.05g~0.15g 时, 人就会感到非常不适, 若加速度超过 0.15g 时, 人就难以忍受. 还有人 对风暴中高层建筑内居住者进行了调研<sup>[4]</sup>, 结果表明加速度均方根值大的大楼中出现运动病症状者的比例要明显超过加速度均方根值小的大楼.

以上例子均说明了高层建筑楼层加速度是影响人体舒适度的主要参数. 基于此, 人们制定了舒适度的设计准则, 我国的高层民用建筑钢结构技术规范也采用了最大加速度标准, 规定重现期为 10 年的最大峰值加速度限值标准为 0.28(m/s<sup>2</sup>)(公共建筑)、0.20(m/s<sup>2</sup>)(公寓建筑), 并给出了顺风向、横风向和扭转风向最大加速度的计算方法.

但是上述准则或规定均未考虑 SSI 的影响, 虽然我们曾提到了这一问题, 但并没有对体系的加速度进行探讨. 有鉴于此, 本文将深入探讨 SSI 对高层建筑加速度的影响. 本文只考虑了顺风向的响应. 文中首先推导了考虑 SSI 后高层建筑加速度均方根值的计算公式, 然后

\* 收稿日期: 2002-05-30

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(批准号: 59925820); 苏州科技学院科研基金项目(HB2001-305)

作者简介: 陈震(1944-), 男, 江苏南通人, 教授, 博士生导师, 工学博士.

通过算例,对影响加速度响应的一些参数进行了分析,分析中将有无 SSI 的结构进行了对比,得出了一些有参考价值的结论.

## 1 计算模型及运动方程

计算模型同文献[1],下式中的  $p_{di}(t)$  为作用在第  $i$  个质量上的脉动风荷载<sup>[1]</sup>:

$$p_{di}(t) = w_{di}(t)A_i \quad (1)$$

式中  $A_i$  为高度  $h_i$  处迎风面的竖向投影面积,  $w_{di}(t)$  为高度  $h_i$  处的脉动风压<sup>[1]</sup>:

$$w_{di} = \rho \mu_s \bar{v}_i v_i(t) \quad (2)$$

式中  $\rho$  为空气密度,  $\mu_s$  为  $h_i$  处结构的体型系数,  $\bar{v}_i$  为该处的平均风速,  $v_i(t)$  为该处的脉动风速.

设  $x_0, \varphi$  分别为由于地基柔性而产生的基础水平位移及转角,  $x_i$  为质量  $m_i$  相对于基础的弹性位移,则对柔性地基结构可写出其时域中的运动方程:

$$\begin{bmatrix} [m]_r & \{m\} & \{mh\} \\ \{m\}^T & m_0 + \sum_1^n m_i & \sum_0^n m_i h_i \\ \{mh\}^T & \sum_0^n m_i h_i & I + \sum_0^n m_i h_i^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_r \\ \ddot{x}_0 \\ \ddot{\varphi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C]_r & \{0\} & \{0\} \\ \{0\}^T & C_{xx} & C_{x\varphi} \\ \{0\}^T & C_{\phi x} & C_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_r \\ \ddot{x}_0 \\ \ddot{\varphi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K]_r & \{0\} & \{0\} \\ \{0\}^T & K_{xx} & K_{x\varphi} \\ \{0\}^T & K_{\phi x} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_r \\ x_0 \\ \varphi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{p_d\}_r \\ \sum_1^n p_{di}(t) \\ \sum_1^n p_{di}(t)h_i \end{Bmatrix} \quad (3a)$$

式中,  $[m]_r, [C]_r, [K]_r$  分别为刚性地基时结构的质量、阻尼及刚度矩阵;下标  $r$  表示刚性地基.

式(3a)也可简写成

$$[M]_f \ddot{x}_f + [C]_f \dot{x}_f + [K]_f x_f = \{P_d\}_f \quad (3b)$$

式中脚标  $f$  表示柔性地基.

当地基为刚性时,体系的运动方程即为

$$[M]_r \ddot{x}_r + [C]_r \dot{x}_r + [K]_r x_r = \{P_d\}_r \quad (4)$$

它为(3)式的特殊形式.

由于在计算中采用了 Davenport 风速谱,它不随高度变化,故(2)式中的  $v_i(t)$  也可认为是不随高度变化的,式(3)及式(4)中的荷载向量可以写成如下的形式:

$$\{P_d\}_r = \{\bar{P}_d\}_r \circ v_d(t) \quad (5)$$

式中的  $\{\bar{P}_d\}_r$  与时间无关,它仅与高度、迎风面积、体型系数等有关.

## 2 楼层加速度均方根值的计算

由于考虑了 SSI,式(3a)中的土壤刚度系数  $K_{ij}$  及阻尼系数  $C_{ij}$  仅有频域中的关系式( $i, j = x, \varphi$ ), (3a)式无法在时域中求解,令

$$v_d(t) = e^{i\omega t} \tag{6}$$

$$\{x\}_f(t) = \{\bar{X}(\omega)\}_f e^{i\omega t} \tag{7}$$

将式(6)、(7)代入式(3a)得

$$(-\omega^2[M]_f + i\omega[C]_f + [K]_f)\{\bar{X}(\omega)\}_f = \{\bar{P}\}_f \tag{8}$$

此即为相互作用体系位移频响函数的计算公式。

如果  $v_d(t)$  的 Fourier 变换为  $\bar{v}_d(\omega)$ , 则 SSI 体系的位移应为

$$\{x(t)\}_f = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{\bar{X}(\omega)\}_f \bar{v}_d(\omega) e^{i\omega t} d\omega \tag{9}$$

其加速度应为

$$\{\ddot{x}(t)\}_f = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} -\omega^2 \{\bar{X}(\omega)\}_f \bar{v}_d(\omega) e^{i\omega t} d\omega \tag{10}$$

$$\text{故加速度的频响函数为 } \{\ddot{x}(\omega)\}_f = -\omega^2 \{\bar{X}(\omega)\}_f. \tag{11}$$

此即相互作用体系各质量相对加速度与基础加速度组成的加速度频响函数向量, 由于这里考虑的是相互作用体系, 故各质量的总加速度的频响函数为

$$\ddot{X}_i^t(\omega) = \ddot{X}_0^t(\omega) + h_i \ddot{\Phi}(\omega) + \ddot{X}_i(\omega) = -\omega^2 [\bar{X}_0(\omega) + h_i \bar{\Phi}(\omega) + \bar{X}_i(\omega)] \tag{12}$$

式中  $\bar{X}_0$ 、 $\bar{\Phi}(\omega)$ 、 $\bar{X}_i(\omega)$  分别为基础平移、转角及第  $i$  个质量相对位移的频响函数。

总加速度频响函数已经求得, 则可由下式计算出第  $i$  个质量总加速度的均方根值。

$$\sigma_{x_i^t} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |\ddot{X}_i^t(\omega)|^2 S_v(\omega) d\omega} \tag{13}$$

式中  $S_v(\omega)$  为风速谱, 这里选用的是 Davenport 风速谱:

$$S_v(\omega) = 4k v_{10}^2 \frac{2\pi x^2}{\omega(1+x^2)^{4/3}} \tag{14}$$

式中,  $x = 1200 \frac{\omega}{2\pi v_{10}}$  为距地面 10m 高度处的平均风速,  $k$  为地面粗糙度系数, 本文取  $k = 0.05$ ,  $\omega$  为圆频率。

### 3 算例及参数影响分析

这里采用与文献[1]相同的结构, 即采用普通的钢筋混凝土框架结构, 基础为无桩的箱型钢砼基础, 每层质量为  $m_i = 314.16t$ ; 每一楼的转动惯量  $I_i = 3.71 \times 10^3 T \cdot m^2$ ; 柱断面取为  $0.3m \times 0.5m$ ; 楼层间刚度为  $1.5 \times 10^5 kN/m$ ; 层高为  $3.0m$ ;  $m_0 = 4m$ ; 转动惯量  $I_0 = 1.766 \times 10^4 kN \cdot s^2 \cdot m$ ;  $\zeta_s$  选为  $0.05$ ; 这里不考虑基础埋深的影响, 基础底面的等效半径为  $r_0 = 10.0m$ ; 土壤的密度为  $1.8t/m^3$ ; 土剪切波速取值范围为  $100m/s \sim 500m/s$ , 10 米高度处的标准风压为  $0.55kN/m^2$ .  $\lg \delta$  的取值在  $0.01 \sim 0.1$  的范围内. 由于本文考虑的是加速度响应, 根据文献[8], 脉动风压按十年一遇的概率周期, 取标准风压的  $0.8$  倍, 但国外文献[5]按六年一遇的周期计, 为安全起见本文在此基础上再乘以  $0.8$ , 即取标准风压的  $0.64$  倍。

计算中首先由式(9)求得各质量的频响函数, 然后按(11)、(12)式求得各质量的加速度频响函数及总加速度频响函数. 最后按(13)式计算各质量总加速度的均方根值. 本算例中频率间隔  $\Delta\omega$  取  $0.05$ , 总共取 4000 个样点, 这样最大的频率可达  $31.83Hz$ , 对于风振响应计算而言这一范围已经足够. (13)式中的积分采用辛普森积分法计算。

为了找出影响结构加速度响应的主要参数, 分析时变动某一参数, 而其余的参数保持不

变. 这些参数分别为: 土中的阻尼系数  $\text{tg } \delta$ ; 结构的阻尼比  $\xi$ ; 结构的层间刚度  $k_i$ ; 土壤的剪切波速  $v_s$  及结构的层数  $N_s$ . 兹将计算结果分别介绍如下:

### 3.1 土壤阻尼的影响

土壤中的阻尼主要由地基复刚度系数  $K_{ij}(i, j = x, \varphi)$  中的  $\text{tg } \delta$  反映<sup>[10]</sup>, 该指标表示在土壤质点循环一周时, 损失的能量与总能量之比. 其取值与运动幅度的大小等有关, 在地震时一般取值为 0.1 ~ 0.4. 但在风振时, 只考虑脉动风压的作用, 由于脉动风速与平均风速之比不大于 0.2<sup>[2]</sup>, 从而脉动风压与平均风压之比不大于 0.04; 即使平均风压达到了地震作用时的荷载量级, 脉动风压也是一相对很小的荷载, 故为小幅振动,  $\text{tg } \delta$  的取值应远小于地震时的取值, 这里取值范围暂定为 0.01 ~ 0.1, 计算中结构取 20 层,  $v_s = 150\text{m/s}$ , 其余参数前面已介绍过, 不再重复.

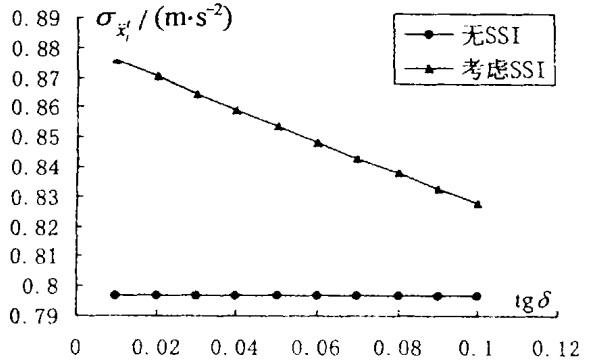


图 1  $m_1$  加速度均方根值与  $\text{tg } \delta$  的关系

该结构顶层质量水平加速度均方根值  $\sigma_{x_1}$  随  $\text{tg } \delta$  变化的情形见图 1.

由图可见, 土中的阻尼对结构的加速度响应均方根值的影响很大, 当  $\text{tg } \delta = 0.01$  时, 考虑 SSI 后的加速度比刚性地基的加速度大了 10%. 随着土中阻尼的加大, 结构加速度几乎是线性关系下降, 在  $\text{tg } \delta = 0.1$  时是大了近 4%. 这一特征与位移随之变化的情形类似.

### 3.2 结构阻尼的影响

结构的阻尼对结构的响应有较大的影响, 不同的结构, 其振型阻尼比取值不同, 对钢结构常常取第一振型 0.02; 对钢筋混凝土结构, 则一般取 0.05. 由于结构在脉动风荷载作用下, 主要考虑第一振型的影响, 故研究第一振型阻尼比对结构加速度均方响应的影响对各种结构类型的风振响应分析具有参考价值, 这里仍采用 20 层的结构, 阻尼比由 0.01 ~ 0.05 变化, 计算中取  $v_s = 150\text{m/s}$ ,  $\text{tg } \delta = 0.05$ . 其顶层质量  $m$  的加速度随  $\xi_1$  变化情形见图 2.

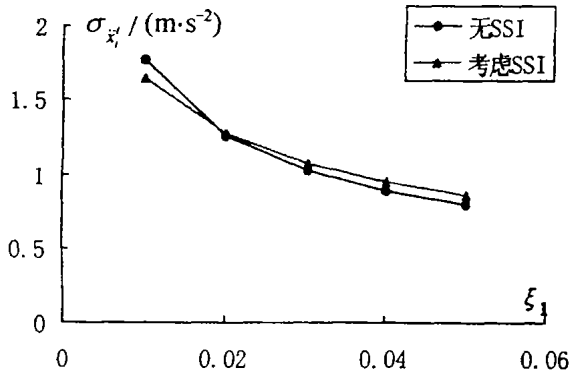


图 2  $m_1$  加速度均方根值与  $\xi_1$  的关系

可以看出, 结构阻尼比对加速度响应有明显影响, 阻尼比为 0.05 时加速度均方根值只有阻尼比为 0.01 的一半左右. 若刚度、质量完全相同时, 采用阻尼比较小的钢结构其加速度响应将明显要大于阻尼比较大的钢筋混凝土结构. 如本例, 若用钢结构, 加速度均方根值达 1.2725 (即约 0.13g), 但用钢筋混凝土结构, 则只有 0.09g 左右. 由该图还可以看到, SSI 在结构第一振型阻尼比小时 (如小于 0.02) 对加速度响应是有利的, 当第一振型阻尼比超过某一范围时 (如大于 0.02), SSI 会加大结构的加速度响应, 当  $\xi = 0.05$  时, 加速度均方根值增加最大幅度为 7% 左右.

### 3.3 土壤刚度的影响

由于考虑了SSI, 故土壤的刚度对结构响应有很大影响, 因本文采用文献[5]的结果, 故地基为线性粘弹性半空间. 土壤刚度主要由土的剪切模量  $G_s$  体现出来. 而  $G_s = \rho_s v_s^2$ , 在计算中土壤的密度  $\rho$  保持不变. 则土壤的刚度大小就由其剪切波速  $v_s$  反映. 本文只考虑软土地基, 其变化范围在  $100 \sim 500 \text{m/s}$  之间. 结构顶层加速度响应均方根值随  $v_s$  变化见图3.

由计算可见, 土壤刚度越小, SSI 的影响越大, 在  $v_s = 100 \text{m/s}$  的场地上, 有 SSI 的加速度比刚性地基结构的加速度增大了近 15%, 其值达到  $0.9143 \text{m/s}^2$ , (约为  $0.09g$ ). 这表明, 在软土地基上(如  $v_s < 200 \text{m/s}$ ), SSI 对加速度响应的影响是不容忽视的.

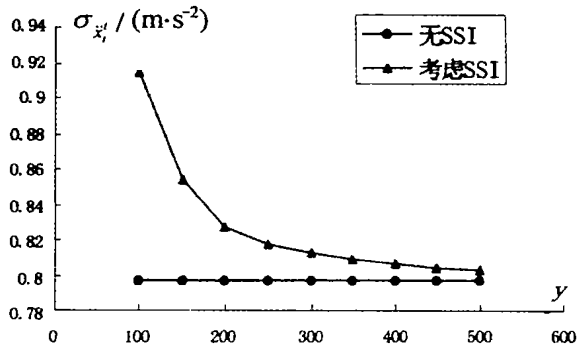


图3  $m_1$  加速度均方根值与  $v_s$  的关系

### 3.4 结构刚度的影响

同样高的结构, 即使平面布置一样, 但采用不同的结构, 则刚度不同. 这也会对结构的风振响应产生影响, 这里将层间刚度乘以一系数模拟刚度的变化, 系数  $\alpha_1$  从 0.4 变到 3.0, 其顶层加速度均方根值的变化见图4.

由图可发现两个明显的特点: (1) 随着结构刚度的加大, 结构加速度响应减少, 即舒适度也越好; (2) 结构刚度增加, 则 SSI 的影响也越大, 当  $\alpha_1 = 3.0$  时, 由于 SSI 效应, 其加速度均方根值比刚性地基时要高出 18%. 这表明在软土地基上, 相互作用对刚性大的结构影响较大.

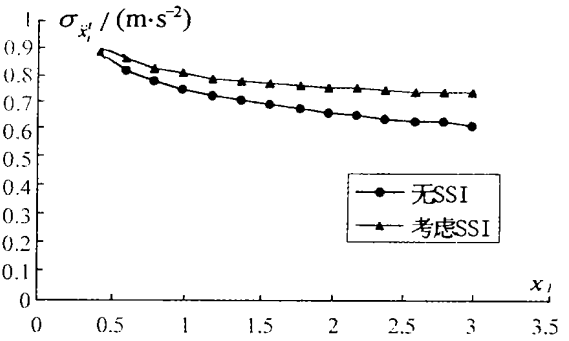


图4  $m_1$  加速度均方根值与  $\alpha_1$  的关系

### 3.5 结构高度的影响

由于风荷载随高度呈抛物线状增加, 结构越高, 风荷载就越大; 另外即使结构的其它参数不变, 其自振特性也会随高度改变, 从而其风振响应也会发生明显的改变. 图5即为顶层加速度均方根值与高度之间的关系.

计算表明, 随着高度增加, 结构加速度均方根值也单调增加, 且 SSI 的影响渐趋明显.

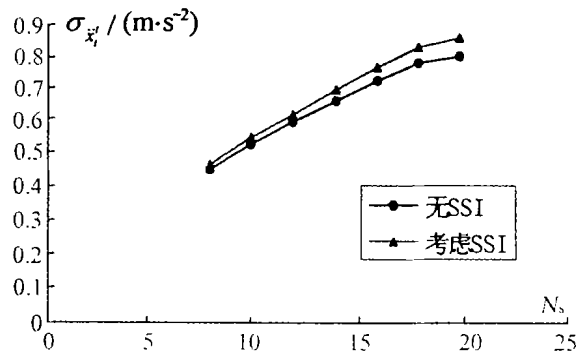


图5  $m_1$  加速度均方根值与  $N_s$  的关系

## 4 结论

土—结构相互作用对脉动风荷载作用下高层建筑结构的加速度响应的影响,结合本文算例具体表现在如下几个方面:

(1) 地基中阻尼系数  $\lg \delta$  从 0.1 到 0.01 变化时, SSI 可使加速度明显增大,最大可增加约 10%;

(2) 当结构阻尼比小时(小于 0.02) SSI 会减小加速度响应,但随结构阻尼比增大, SSI 会增大加速度响应.当阻尼比达 0.05 时加速度响应最大可增大 7%左右.

(3) 结构高度不变,随着相对刚度的增加, SSI 的影响迅速增加,最大响应可比刚性地基上的响应超出 15%~18%;

(4) 在其余参数不变的情形下结构越高,则 SSI 对加速度响应的影响就越大.

由以上结果,可见 SSI 对高层建筑结构在风荷载作用下的加速度响应,亦即对其舒适度有明显的影 响,故在高层、高耸建筑结构的抗风设计中应考虑 SSI 效应.

### 参考文献:

- [ 1 ] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[ M ]. 上海: 同济大学出版社, 2001.
- [ 2 ] 刘尚培, 项海帆, 谢霖明. 风对结构的作用—风工程导论[ M ]. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [ 3 ] YAMADA M, GOTO T. Criteria for motions in tall buildings, college of engineering[ M ]. Tokyo: Hosei University, 1995.
- [ 4 ] HANSEN R J, REED J W, VANMARCKE E H. Human response to wind-induced motion[ J ]. J Struct Div, 1973, (7): 1589—1605.
- [ 5 ] VELETSOS A S, VERBIC B. Vibration of Viscoelastic Foundations[ J ]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1973, 2(1): 87—102.

## Effect of soil-structure interaction on comfortable extent of tall building to wind-induced vibration

CHEN Rong<sup>1</sup>, XUE Song-tao<sup>1,2</sup>, FAN Cun-xin<sup>1,3</sup>, TANG He-shen<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji Univ., Shanghai 200092, China;

2 Dept. of Architecture School of Science and Engineering Kinki Univ. Osaka, Japan; 3 Dept. of Urban Construction, USTC, Suzhou 215011, China)

**Abstract:** Considering soil-structure interaction (SSI), the formula of acceleration response is derived for high rise building subjected to fluctuating wind load. Numerical examples show that SSI has evident effect on the acceleration response of the building. Generally speaking, SSI may increase the acceleration response of tall building constructed on soft soil ground, accordingly strengthen human discomfort in the building, or even affect its service function. So it should be paid more attention to the effect of SSI in the design of tall building.

**Key words:** soil-structure interaction; high-rise building; wind-induced vibration; acceleration response; comfortable extent

(责任编辑: 周建兰)