

土-结构相互作用对结构风振响应的影响*

陈 镨¹ 薛松涛^{1,2} 王远功¹ 秦 岭¹

(¹同济大学结构工程与防灾研究所 上海 200092) (²日本近畿大学理工学部建筑学科 大阪 日本)

摘要 通过框架结构的风振响应计算,说明土-结构相互作用(简称 SSI)对结构风振响应的影响。计算结果表明:在结构的风振响应分析中,考虑 SSI 并不总是安全的。在土中阻尼较小时,考虑 SSI 后,体系的第一频率较不考虑 SSI 时(即所谓的“刚性地基”)明显降低,而弹性位移反而较刚性地基时的值大。后一现象在相对刚度较小时更加明显。此外,考虑 SSI 后,无论结构高度如何,结构各楼层的总位移总是远远大于刚性地基时的位移。这可能使人体产生明显的不舒适感。因此,在风振响应分析中应当考虑 SSI 效应。

关键词 土力学,土-结构相互作用,风振响应,框架结构

分类号 TU 311.3

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2003)02-0309-07

EFFECTS OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION ON THE RESPONSES OF STRUCTURE TO WIND-INDUCED VIBRATION

Chen Rong¹, Xue Songtao^{1,2}, Wang Yuangong¹, Qin Ling¹

(¹Institute of Structural Engineering and Disaster Prevention, Tongji University, Shanghai 200092 China)

(²Department of Architecture, School of Science and Engineering, KINKI University, Osaka City, Japan)

Abstract Through the response evaluation of frame structures to wind-induced vibration, the effects of soil-structure interaction (SSI) on the responses of the structures are illustrated. Evaluation results show that in the response analysis of structure to wind-induced vibration, the effects of SSI on the wind responses are not always conservative. SSI can obviously reduce the first resonant frequency of the structure system. When the damping in soil is small, the elastic relative displacements of structures with SSI may be greater than that of structures without SSI. This phenomenon is more significant if the relative stiffness of the superstructure and its surrounding ground is smaller. Moreover, the total displacements of the structure with SSI are always much greater than that of the structures without SSI, which can make people produce strong uncomfortable perception. Therefore, in the response analysis of structure to wind-induced vibration, the effect of soil-structure interaction should be considered.

Key words soil mechanics, soil-structure interaction, responses of structure to wind-induced vibration, frame structure

1 引言

土-结构动力相互作用的研究已有 40 余年的历史^[1]。有关的文献浩如烟海,而且已出现了一些专

业软件,专门分析考虑 SSI 的结构动力响应(如 FLUSH 等)。有些国家已经将 SSI 的内容列入相应的设计规范中(如 1978 年美国 ATC 建筑抗震暂行规定和中国的《建筑抗震设计规范》^[2]等)。综观有关 SSI 的文献,可以说绝大多数是关于结构的地震响

2001 年 6 月 7 日收到初稿,2001 年 7 月 9 日收到修改稿。

* 国家杰出青年科学基金资助项目(59925820)。

作者 陈 镨 简介:男,1944 年生,1966 年毕业于同济大学应用力学专业,1999 年于同济大学获岩土工程学科工学博士学位,现任同济大学结构工程与防灾研究所研究员、博士生导师,主要从事地震工程与工程振动等方面的教学和研究工作。

应分析的，风振响应分析中考虑 SSI 的文献少到可以用“凤毛麟角”来形容。世界各国的建筑结构设计规范中没有明显提出风振响应计算要考虑 SSI 效应。究竟是什么因素导致了这一现象？作者认为，这与人们的思维习惯有关。当不考虑 SSI 时，无论地震还是风振，结构的运动方程形式完全一样。即使考虑了 SSI，列出的方程也极其类似。人们自然而然地会认为，这两种动力问题其特性是相同或相似的。大量的研究表明，在地震作用时，高层建筑考虑 SSI 效应后，其第一共振频率会降低，质量的弹性位移(即质量相对于基础的位移)亦减小，质量的总位移会增加。人们普遍认为，地震作用时，考虑 SSI 效应是有利的。这一点在我国的抗震设计规范中体现得最明显。该规范的第 4.2.6 条指出：“在 III, IV 类场地上，采用箱基和刚性较好的筏基的钢筋混凝土高层建筑，若考虑地基与结构相互作用的影响，按刚性地基假定分析的水平地震作用，可根据结构和场地的不同，折减 10%~20%。其层间变形可按折减后的楼层剪力计算。”^[2]，在上海的抗震设计规程中也作了类似的规定^[3]。这就清楚地表明，在地震时考虑 SSI 是有利的。但在风荷载作用时，考虑 SSI 效应是否会产生同样的或类似的结论呢？这一点并不清楚。根据结构在风振及地震时运动方程相类似这一点，似乎应当得出相同的结论。然而恰恰出现了例外。作者在文[4]中发现，考虑 SSI 效应后，体系的第一共振频率降低了，但共振幅值增大了，而且增加的比例不小。这即表明在风振响应分析中考虑 SSI 后，结构反而变得不安全了。这是计算错误还是某种规律的反映？在文[4]中未进行深入探讨。文[5]已指出：在地震响应分析中考虑 SSI 并不总是安全的，只不过在实际工程中绝大多数结构都不符合他们所说的“不安全”的条件，故这一论点逐渐被人们“遗忘”了。最近作者对此问题重新进行了探讨，想找出：究竟在什么情形下考虑 SSI 是安全的？在什么情形下考虑 SSI 是不安全的？高层(高耸)结构风振响应分析要不要考虑 SSI 效应？等等。本文以高层框架结构为例进行了初步的计算，计算结果表明，对高层(高耸)结构，当地基阻尼较大，且上部结构刚度与地基刚度之比(即相对刚度)较大时，SSI 效应对体系的响应是有利的，结构的地震响应即属此种情形；但当地基阻尼较小，且相对刚度较小时，SSI 效应对体系的响应不利，即体系弹性位移会超过刚性地基时的值。高层(高耸)结构的风振响应分析当属这种情形。另外，不论结

构的高度如何，考虑 SSI 后，体系的总位移远远大于刚性地基时的位移，这会使人体产生很强的不舒适感。因此，无论从结构的强度分析，还是从人体的舒适度来看，高层(高耸)结构进行风振响应计算时，均应考虑 SSI 效应。

2 考虑 SSI 效应时结构的运动方程

本文以剪切型框架结构为例来说明 SSI 在结构风振响应中的作用。为了进行对比，还计算了不考虑 SSI 效应时结构风振响应(图 1)。本文只考虑顺风向的风振问题。

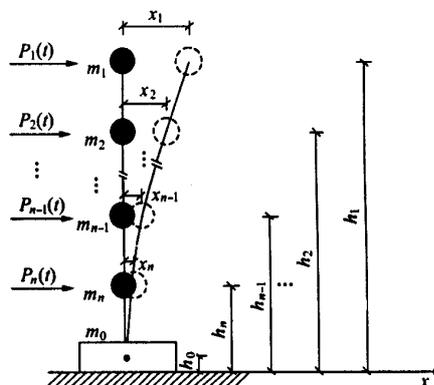


图 1 不考虑 SSI 效应时结构受力及变形图
Fig.1 Structure model without SSI

若只考虑结构在 $x-z$ 平面中的运动，且不计质点的竖向运动时；不考虑 SSI 效应的结构在脉动风作用下的运动方程为

$$M\ddot{x}_i + C\dot{x}_i + Kx_i = P_d(t) \quad (1)$$

式中： M 、 C 、 K 分别为结构的质量、阻尼及刚度矩阵； x_i 为质量的位移向量，脚标“s”表示刚性地基； $P_d(t)$ 为作用于各质量上的脉动风荷载向量； $P_d = w_d A_i$ ， A_i 为高度 h_i 处迎风面的竖向投影面积， w_d 为高度 h_i 处的脉动风压， $w_d = \rho \mu_s \bar{v}_i v_i(t)$ ^[6]， ρ 为空气密度， μ_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。

当考虑 SSI 效应时，体系的运动方程为

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{x}'_f + C\dot{x}'_f + Kx'_f &= P_d(t) \\ \sum m_i \ddot{x}'_i + m_0(\ddot{x}_0 + h_0\ddot{\varphi}) + Q(t) &= \sum P_d(t) \\ \sum m_i \ddot{x}'_i h_i + m_0(\ddot{x}_0 + h_0\ddot{\varphi})h_0 + (\sum I_i + I_0)\ddot{\varphi} &+ \\ M(t) = \sum P_d(t)h_i & \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： x'_f 为总位移向量，角标“f”表示柔性地基，即考虑 SSI 效应； $x'_i = x_0 + h_i\varphi + x_i$ ； h_0 为基础质

心至底面的高度； h_i 为质点 m_i 至基础底面的高度； I_i 为质点 m_i 关于其质心的转动惯量 ($i=0, 1, \dots, n$)， x_0 为基础底面形心由于地基变形引起的水平位移； j 为基础质心由于地基变形引起的转角； $Q(t)$ ， $M(t)$ 为基础与地基之间的相互作用力，应当指出， $Q(t)$ 及 $M(t)$ 中包含了地基的阻尼力^[5]。这里不考虑基础埋置深度范围内侧向土的阻抗，且不计基础水平位移与转角之间的耦合作用。由文[5]在频域中，线性粘弹性半空间表面无质量刚性圆盘与地基相互作用力和基础位移之间有如下关系：

$$\begin{Bmatrix} Q(\omega) \\ M(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx}(\omega) & \\ & K_{jj}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_0(\omega) \\ \mathbf{F}(\omega) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中： $Q(\omega)$ ， $M(\omega)$ 为无质量刚性圆盘与地基间相互作用力 $Q(t)$ ， $M(t)$ 在频域内的幅值； $X_0(\omega)$ ， $\mathbf{F}(\omega)$ 为由于地基变形引起的无质量刚性位移 $x_0(t)$ ， $\mathbf{j}(t)$ 在频域中的幅值。记 $i = \sqrt{-1}$ ，则 $K_{xx}(\omega)$ 与 $K_{jj}(\omega)$ 可表示为

$$K_{xx}(\omega) = K_x(k_x^v + ia_0c_x^v),$$

$$K_{jj}(\omega) = K_j(k_j^v + ia_0c_j^v),$$

$$K_x = \frac{8Gr_0}{2-m}, \quad K_j = \frac{8Gr_0^3}{3(1-m)}$$

其中， G 为地基土的剪切模量； m 为泊松比； r_0 为基础底面的等效半径； k_x^v ， c_x^v ， k_j^v 及 c_j^v 的详细表达式见附录。注意这些式中的 $\tan d$ 代表地基中能量的损耗情况，它表征地基中的阻尼特征。应当强调一点，即这里的刚度系数 $K_{xx}(\omega)$ 及 $K_{jj}(\omega)$ 均为复型量，其虚部代表地基的阻尼系数。

比较式(1)和(2)，可以看出，考虑 SSI 与不考虑 SSI，结构体系发生了根本的变化，因此，运动方程就有了很大的不同，在图 2 所示的情况中，前者就比后者多了 2 个方程，亦即前者比后者多了 2 个自由度。对于一般的空间问题，前者比后者多出了 6 个自由度。此外，由于结构基础与地基之间相互作用力和基础位移之间仅有频率中的关系，在刚性地基情形中大家熟知的振型已不再存在。故在时域中常用的振型分解法不再适用。问题的求解应在频域中进行。

3 考虑 SSI 效应时结构频响函数的计算

在式(1)，(2)中，作用于第 i 个质点上的风荷载为^[6]

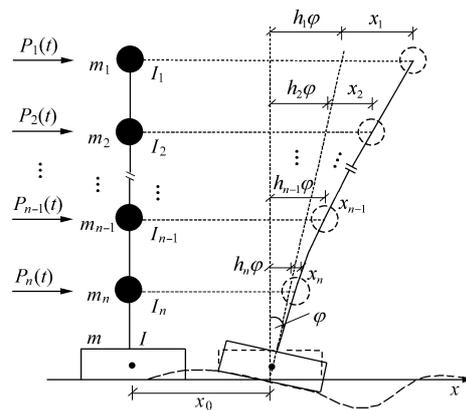


图 2 考虑 SSI 时结构受力及变形图
Fig.2 Structure model with SSI

$$p_{di} = A_i r m_{z_i} \bar{v}_i v_i(t) \quad (2)$$

在第 i 个质点处的平均风速可由下式求得^[6]：

$$\bar{v}_i = \bar{v}_{10} \left(\frac{z_i}{10} \right)^a = m_{z_i} \bar{v}_{10} \quad (3)$$

式中： z_i 为第 i 个质点离地面的高度； m_{z_i} 为高度系数； a 为地面粗糙度指数； \bar{v}_{10} 为 10 m 高度处的平均风速，

$$\bar{v}_{10} = \sqrt{\frac{2}{r}} w_{10} \quad (4a)$$

或

$$\bar{v}_{10} = 40 \sqrt{w_{10}} \quad (6b)$$

式中： w_{10} 为 10 m 高度处的标准风压。由于在计算响应统计量中常采用不随高度变化的脉动风速谱，故可认为 $v_i(t)$ 不随高度而变化。所以，对任意质点均取 $v(t)$ 。这即表明，式(1)及式(2)中的 $P_d(t)$ 可写成如下的形式：

$$P_d(t) = P v(t) \quad (5)$$

式中： P 为与高度 z_i 有关的向量，向量中各元素可由式(4)，(5)求得，其单位为 kg/s，kg 为质量单位，s 为时间单位(秒)。

当 $v(t) = e^{i\omega t}$ 时，可令

$$x_s(t) = X_s(\omega) e^{i\omega t} \quad (6)$$

代入式(1)中，得

$$(-\omega^2 M + i\omega C + K) X_s(\omega) = P \quad (7)$$

解式(8)，即得结构在刚性地基时的位移传递函数 $X_s(\omega)$ ，它表示风速幅值为 1m/s 时结构的位移响应，其单位为 s。

若令