

考虑桩—土—结构相互作用时高层建筑 风振响应分析 (I)

范存新¹, 张毅¹, 唐和生²

(1. 江苏省结构工程重点实验室(苏州科技学院), 江苏 苏州 215011;

2. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

摘要: 对考虑桩—土—结构相互作用时高层建筑顺风向风振响应的计算问题而言, 由于桩土系统的影响, 整个结构体系的动力特性较刚性地基的情形有了很大的不同。考虑到影响高层建筑风振响应的参数往往是综合性的, 而非单参数的影响, 采用相对刚度这一参数, 对桩—土—结构相互作用时对结构顺风向风振响应的影响进行了研究, 所得结论可供设计时参考。

关键词: 桩—土—结构相互作用; 风振响应; 高层建筑; 相对刚度

中图分类号: TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-1933(2009)06-099-03

Analysis of wind-induced vibration response of high-rise building considering Pile-Soil-Structure Interaction (I)

FAN Cunxin¹, ZHANG Yi¹, TANG Heshen²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Structure Engineering (Suzhou University of Science and Technology), Suzhou 215011, China;

2. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Due to the effect of the pile-soil system, the dynamic character is much more different from the rigid foundation for the high rise building subjected to fluctuating wind load considering the Pile-Soil-Structure Interaction (PSSI). Considering the combined effect of different parameters, the effect of the parameter relative stiffness to the wind-induced vibration response of high-rise building are studied. The conclusion can be applied to the structural designing.

Key words: Pile-Soil-Structure Interaction (PSSI); wind-induced vibration response; high-rise building; relative stiffness

0 引言

高层建筑作为城市中重要的建筑物, 其对城市建设的影响日趋重要, 而高层建筑特别是超高层建筑, 其基频较低, 为典型的柔性结构, 在进行结构设计和分析时, 应全面考虑其整体的风振效应^[1]。虽然多年来在结构风工程领域的理论和应用方面取得了大量的成果, 解决了许多工程实际的问题, 但在某些方面还需要做进一步的深入研究, 如桩—土—结构相互作用对高层建筑风振响应的影响问题就需要深入的研究。由于桩土系统的影响, 整个结构体系的动力特性较刚性地基的情形有了很大的不同, 我们也曾对桩和土体与结构在风振时的相互作用作了一些研究和分析^[2-3]。但在一些影响参数中, 往往考虑的是单参数的影响, 而影响高层建筑风振响应的

参数往往是综合性的。本文在前面研究的基础上, 采用国外许多研究者常常采用的“相对刚度”这一参数, 对桩—土—结构相互作用时对高层建筑风振响应的影响作了进一步的计算和分析, 所得结论可供设计时参考。

1 计算模型和运动方程

本文采用的计算模型同文献[3], 计算模型采用框架—剪力墙钢筋混凝土结构, 计算时的简化模型简述如下: 对整个框架—剪力墙钢筋混凝土结构, 按通常的方法简化为纵向的一片总的剪力墙和一片总框架组成, 楼板被看成为楼层平面位置上刚性连杆, 在连杆位置上剪力墙与框架的位移协调。对剪力墙看作为同时承受弯曲与剪切变形因素的层间弯剪模型。框架部分理想化为只承受剪切变形的层间剪切模型。对下部承台和桩, 假设为如下的分析计算模型^[4-5], 即整个地基土分为3层; 每层土都是均匀、各向同性、线粘弹性介质, 具有不随频率变化的滞后型材料阻尼, 在某一层内土的性质是不变的, 各层之间土的性质可以是不同的。

收稿日期: 2008-06-02

作者简介: 范存新(1968-), 男, 江苏苏州人, 教授, 博士, 主要从事工程结构振动方面的研究。

基金项目: 江苏省结构工程重点学科项目及苏州市社会发展项目(SS05011)

E-mail: fan@mail.usts.edu.cn

对计算模型中的群桩基础,采用迭加法,将求出的单桩阻抗函数根据每两根桩之间的动力相互作用因子进行迭加,即可得到群桩的阻抗函数^[6]。

动力相互作用因子是无量纲、频率相关的复数,在分析中忽略其他桩对两根桩间相互作用的影响,因而群桩的动力特性可以根据每两根桩之间的相互作用因子来近似表示,其定义如下:

$$\alpha_{ij} = \frac{\text{桩 } j \text{ 处施加荷载, 桩 } i \text{ 处引起的动力位移}}{\text{桩 } j \text{ 处施加荷载, 桩 } j \text{ 处的动力位移}}$$

其中,桩 j 称为主动桩(或称为源桩),桩 i 称为被动桩。以上的动力位移是在单桩情况下求得,位移包括平动和摆动两种。

当考虑桩—土—结构相互作用的影响时,整个采用桩基础的弯剪型钢筋混凝土框架剪力墙结构可简化为一底部有弹性支承的悬臂体系,相应的基础提供反力和反力偶,整个体系简化后的力学模型如图 1 所示^[3]。

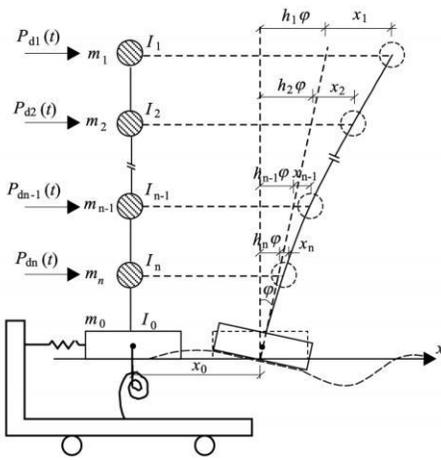


图 1 考虑相互作用的结构模型

Fig.1 Structure model considering interaction

对图 1 所示的结构体系,容易得到其上部结构的运动方程为

$$[M] \{\ddot{x}_f^i\} + [C] \{\dot{x}_f^i\} + [K] \{x_f^i\} = \{P_d(t)\} \quad (1)$$

式中 x_f^i 为总位移向量,角标“ f ”表示柔性地基,即考虑桩—土—结构相互作用的影响。

$$x_f^i = x_0 + h_i \varphi + x_{fi} \quad (2)$$

式中 h_i 为质量 m_i 至基础底面的高度。

$$\left. \begin{aligned} & (-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]) \{X_f(\omega)\} + [-\omega^2 [M] X_0(\omega)] + [-\omega^2 [M] h \Phi(\omega)] = \{P(\omega)\} \\ & - \sum_i^n m_i \omega^2 X_{fi}(\omega) + [K_{xx}(\omega) - (m_0 + \sum m_i) \omega^2] X_0(\omega) + [K_{x\varphi}(\omega) - (m_0 h_0 + \sum m_i h_i) \omega^2] \Phi(\omega) \\ & = \sum p_i(\omega) \\ & - \omega^2 \sum m_i h_i X_{fi}(\omega) + [K_{\varphi\varphi}(\omega) - (m_0 h_0 + \sum m_i h_i) \omega^2] X_0(\omega) + [K_{\varphi\varphi}(\omega) - (I_0 + \sum I_i + m_0 h_0^2 + \sum m_i h_i^2) \omega^2] \Phi(\omega) = \sum p_i(\omega) h_i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 $I = [1, 1, \dots, 1] T$;

对整个结构体系建立 x 方向的动力平衡方程,得

$$\sum m_i \ddot{x}_{fi} + m_0 (\ddot{x}_0 + h_0 \ddot{\varphi}) + Q(t) = \sum p_{di}(t) \quad (3)$$

式中 h_0 为基础质心至底面的高度; x_0 为基础底面形心由于地基变形引起的水平位移; φ 为基础质心由于地基变形引起的转角; $Q(t)$ 为基础与地基之间的相互作用力。

对整个结构体系建立对于基础底面转动轴的力矩动力平衡方程,得

$$\sum m_i \ddot{x}_{fi} h_i + m_0 (\ddot{x}_0 + h_0 \ddot{\varphi}) h_0 + \left(\sum I_i + I_0 \right) \ddot{\varphi} + M(t) = \sum p_{di}(t) h_i \quad (4)$$

式中 I_i ——质量 m_i 关于其质心的转动惯量 ($i=0, 1, \dots, n$);

$M(t)$ ——基础与地基之间的相互作用力偶。

方程 (1), (3), (4) 即是考虑桩—土—结构相互作用时的结构风振运动方程,可以看出,这是 $n+2$ 个联立方程。应当指出, $Q(t)$ 及 $M(t)$ 中包含了地基的阻尼力。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与基础位移之间有如下的关系^[4,7]:

$$\begin{Bmatrix} Q(\omega) \\ M(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx}(\omega) & K_{x\varphi}(\omega) \\ K_{\varphi x}(\omega) & K_{\varphi\varphi}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_0(\omega) \\ \Phi(\omega) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中 $Q(\omega), M(\omega)$ 分别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; $X_0(\omega), \Phi(\omega)$ 分别为由于地基变形引起的无质量刚性位移 $x_0(t), \varphi(t)$ 在频域中的幅值; $K_{xx}(\omega), K_{x\varphi}(\omega), K_{\varphi\varphi}(\omega)$ 为地基的阻抗函数,均为复型量,其虚部代表了基础的阻尼系数。具体表达式较为复杂,请参见文献 [4]。

若令 $\left. \begin{aligned} x_f(t) &= X_f(\omega) e^{i\omega t} \\ x_0(t) &= X_0(\omega) e^{i\omega t} \\ \varphi(t) &= \Phi(\omega) e^{i\omega t} \end{aligned} \right\}$ 代入式 (1), (3) 及式 (4), 得:

$h = [h_1, h_2, \dots, h_n] T$ 。

解式(6), 即可得结构考虑 SSI 效应的位移频响函数 $X_f(\omega)$, $X_0(\omega)$ 及 $\Phi(\omega)$ 。由此可得, 总位移 $x_f^i(t)$ 的位移传递函数如下:

$$X_f^i(\omega) = X_f(\omega) + 1X_0(\omega) + h\Phi(\omega) \quad (7)$$

若不考虑各质量之间的空间相关性, 则各质量位移响应的根方差为^[9]

$$\sigma_{xi} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |X_i(\omega)|^2 S_v(\omega) d\omega} \quad (8)$$

式中 $S_v(\omega)$ 为风速谱密度函数, 计算中, 采用 Davenport 风速谱^[10]。

2 数值计算与分析

采用的主要计算参数如下: 上部结构为框架—剪力墙钢筋混凝土结构, 基础为有刚性承台的群桩基础, 结构标准层高层为 3.0 m; 层数由 20 ~70 层, 根据所计算的层数不同, 相应的结构标准层平面面积有所变化, 层间刚度也有所不同, 层数较高的对应较大的标准层面积和层间刚度; 每层的楼面荷载为 1 t/m^2 ; 基础底面的等效半径为 $r_0 = 15.0 \text{ m}$; 土壤的密度为 1.8 t/m^3 ; 土剪切波速取值范围为 $150 \sim 550 \text{ m/s}$; 10 m 高度处的标准风压为 0.55 kN/m^2 ; 桩采用圆截面, 半径为 $0.25 \sim 0.45 \text{ m}$; 桩长度为 24 m, 36 m, 48 m 及 60 m 4 种, 层数较高的结构对应较长的埋入桩; 桩间距为 2.5 m; 泊松比 $\mu_s = 0.4$, $\mu_b = 0.25$ 。本文主要相对刚度的变化对结构响应的影响, 相对刚度 $a_0 = \frac{\omega_1 r_0}{v}$, 这里 r_0 为基础等效半径; ω_1 为结构体系的第一自振频率, 它综合反映了结构体系本身的特性(如刚度、质量等); v 为土中的剪切波速, 它反映的是地基土的刚度情形; a_0 为一无量纲参数。

下面, 分述各种参数变换时不同的计算结果。

图 2, 3 分别为剪切波速 V_s 变化时结构顶层位移与加速度均方根值随 a_0 变化的关系图。从图中

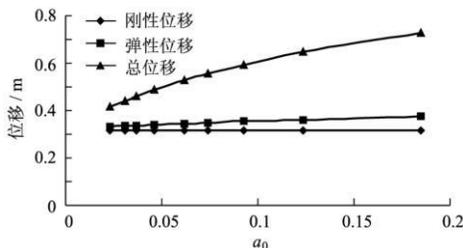


图 2 剪切波速 V_s 变化时结构顶层位移均方根值与 a_0 的关系

Fig. 2 Relationship between the structure displacement RMS value and a_0 with different V_s

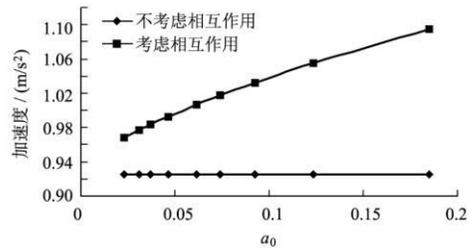


图 3 剪切波速 V_s 变化时结构顶层加速度均方根值与 a_0 的关系

Fig. 3 Relationship between the structure acceleration RMS value and a_0 with different V_s

可以看出, 随着无量纲频率 a_0 的增大, 结构的位移响应和加速度响应均增大, 另外, 相互作用的影响效果也显著。

参考文献:

- [1] 楼文娟, 孙炳楠. 风与结构的耦合作用及风振响应分析 [J]. 工程力学, 2000, 17 (5).
- [2] 陈 镨, 薛松涛, 王远功, 等. 土-结构相互作用对结构风振响应的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (2): 309-316.
- [3] 范存新, 陈 镨, 薛松涛. 桩-土-结构相互作用对高层建筑顺风向风振响应的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (6): 2078-2084.
- [4] Veletsos A S, Verbit B. Vibration of Viscoelastic Foundations [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1973, 2 (1): 87-102.
- [5] 俞载道, 付公康. 桩-土-高层框剪结构动力相互作用分析 [J]. 同济大学学报, 1984, (1): 66-79.
- [6] 范存新, 张 毅, 薛松涛, 等. 考虑桩土动力相互作用时群桩阻抗函数的分析 [J]. 西安科技大学学报, 24 (3): 284-288.
- [7] Novak M. Dynamic Stiffness and Damping of Piles [J]. Can. Geotech J., 1974, (2): 574-598.
- [8] Galsworthy J K, El Naggar M H. Across-wind response of reinforced concrete chimneys with soil-structure interaction [A]. Proc. 50th Canadian Geotechnical Conference Ottawa; 1997, 1: 364-371.
- [9] Ahsan Kareem. Dynamic response of high-rise buildings to stochastic wind loads [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41-44: 1101-1112.
- [10] Davenport A G. How can we simplify and generalize wind loading [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 54-55: 667-669.
- [11] 项海帆, 瞿伟廉. 高层建筑风振控制基于规范的实用设计方法 [J]. 振动工程学报, 1999, 12 (2): 151-156.
- [12] 张相庭. 高层建筑抗风抗震设计计算 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [13] 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.

(待 续)