

具有埋入式基础的高层建筑考虑土-结构相互作用时的风振响应

范存新¹, 曹新风¹, 唐和生²

(1. 苏州科技学院江苏省结构工程重点实验室, 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:目的 研究具有埋入式基础的高层建筑考虑土-结构相互作用时的风振响应,为高层建筑的抗风设计提供理论依据.方法 以埋入式基础的框架结构为例,建立了高层建筑的简化计算模型,导出结构的运动方程,进而对比分析了刚性地基和柔性地基条件下,土-结构相互作用对结构风振位移和加速度响应的影响.结果 当结构高度达到15层时,弹性位移增幅已接近刚性位移的50%,再考虑结构摆动的转角和基础平移,总位移已显著大于刚性位移,达到刚性位移的2倍左右.结论 考虑土-结构相互作用后,结构体系自振频率明显降低,结构总响应幅值总是大于刚性地基时的响应幅值;且在给定条件下,结构越高,地基越柔,影响越大;而基础埋深越大,影响则越小.

关键词:土-结构相互作用;高层建筑;埋入式基础;风振响应

中图分类号:TU311.3 文献标志码:A

Research on Response of High-Rise Building with an Embedded Base to Wind-Induced Vibration Considering Soil-Structure Interaction

FAN Cunxin¹, CAO Xinfeng¹, TANG Hesheng²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Structure Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, China 215011; 2. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai, China 200092)

Abstract: The purpose of this paper is to study the response of high-rise building with an embedded base to wind-induced vibration considering soil-structure interaction (SSI), which is to provide theoretical proof for the wind resistant design of the high-rise building. The method is that a simplified model of a high-rise building with an embedded base is proposed, as well as the structure motion equation is established. Based on this, the influence of soil structure interaction to the displacement and acceleration response aroused by wind-induced vibration is analyzed under rigid foundation and flexible foundation. The results figure out the quantitative relationship between the effect of SSI and wind vibration effect. By considering the effect of SSI, the structure vibration frequency decreases significantly. The total response amplitude is always greater than that without considering SSI. And under given conditions, the higher structure height and the more flexible foundation is, the greater effect of the SSI will be. Also the effect of SSI goes smaller with the depth foundation increasing.

Key words: soil-structural interaction; high-rise building; embedded base; wind-induced vibration response

收稿日期:2013-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51178337);江苏省高校教师境外研修项目

作者简介:范存新(1968—),男,教授,博士,主要从事结构振动方面的研究.

风灾作为自然灾害的主要灾种之一,对国民经济的发展具有不容忽视的影响.随着我国经济的高速发展,越来越多的高层建筑不断涌现,因此在很多地区,抗风设计成为高层建筑结构设计的主要内容之一,其中对高层建筑风振响应的研究更是不可或缺的环节.由于计算过程的复杂性,目前在风振响应计算中,大多数分析均做了一定的简化,一般不考虑地基的柔性对结构风振效果的影响.但是,建造在柔性地基上的高层建筑与建造在固定地基上的高层建筑,其风振的响应是不同的.当考虑土的刚度时,结构的振动能量通过地基传递到土中,地基的无限性使结构的部分振动能量通过波的传播向无限地基发生散逸,形成辐射阻尼.同时,也有部分振动能量由于地基介质中的材料阻尼作用而消耗,王开顺在《地基阻抗与结构地震反应》一文中定义这个复杂的现象就是土-结构相互作用(SSI).随着新式材料的推广以及建造高层建筑技术的创新,当前的建筑物正越来越趋向于高柔方向发展,SSI效应对高层建筑的风振响应影响已经开始引起了研究者的重视^[1-4].但是传统的SSI效应研究基本集中在地震工程领域中,一般认为考虑土-结构相互作用会使结构更安全,考虑SSI效应对结构的抗震是

有利的^[5-7].而相较于地震领域,风振的特殊性决定了这一结论并不能完全应用到风工程领域中^[8-14].因此,考虑土-结构相互作用对高层建筑风振响应的影响具有极大的理论价值和应用前景.

在风工程领域中,风荷载作用下的结构运动方程与地震作用下的结构运动方程形式基本一致.但由于风与地震卓越周期的不同、输入形式也不一样等因素,使得高层建筑风振响应的研究不应简单地采用刚性地基的假定.笔者以一埋入式基础的高层建筑为例,建立了高层建筑的简化计算模型,导出了结构的运动方程,并根据结构动力学的理论对运动方程进行了求解,得到了结构风振的频响函数,进一步研究了土-结构相互作用对结构风振特性的影响,以及响应特性与系统参数间的量化匹配.通过MATLAB软件编程计算,给出了结构风振总响应幅值与建筑物的高度、基础埋深以及地基条件等之间的定性关系,所得结论为结构设计时提供了参考.

1 计算模型与结构运动方程

刚性地基与柔性地基下的结构计算简图如图1所示.

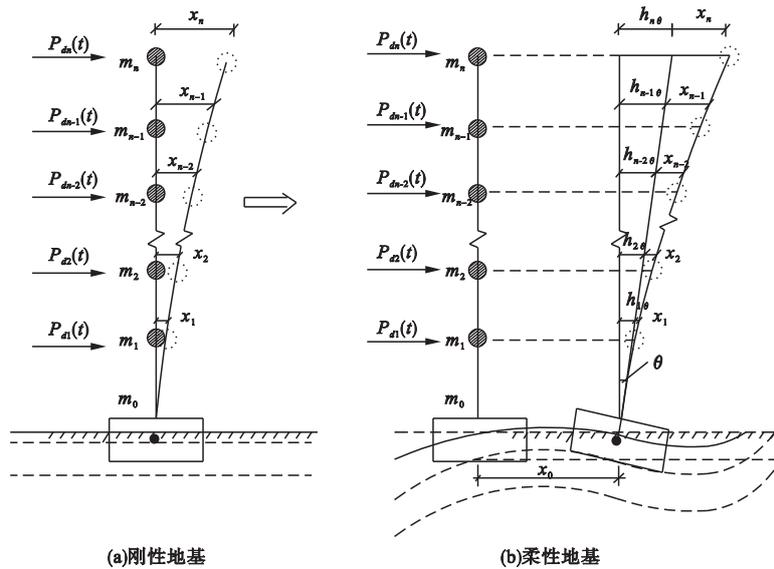


图1 刚性地基与柔性地基下的结构模型

Fig. 1 Structure model of rigid foundation and flexible foundation

考虑SSI效应后,对一幢楼层为n的高层建筑,若假设脉动风垂直作用在结构表面,只考虑结构在x-z平面内的运动,即不计质点的横向运动,用表示第i个质点楼层处的集中风荷载,则刚性地

基下结构在脉动风作用下的运动方程为 $M\{x_s(t)\} + C\{x_s(t)\} + K\{x_s(t)\} = \{P_d(t)\}$. (1) 式中:M、C、K分别为结构的质量、阻尼及刚度矩阵; x_s 为外界风荷载作用下的刚性位移.

当考虑 SSI 效应影响时,由于地基的柔性,在外界风荷载的作用下,基础会发生滑移和旋转,导致结构产生一个 $x-z$ 平面内的水平位移 x_0 和偏转角 θ 。由于脉动风是一个随机荷载,则上部结构会在 θ 角范围内发生来回摆动,产生转动惯量 J_n 。此外,地基除提供上部结构的反力 $Q(t)$ 外,还提供提供一个反向力偶 $M(t)$,根据结构动力学知识,可以得到上部结构 n 个质点的运动方程为

$$M\{x'_f(t)\} + C\{x_f(t)\} + K\{x_f(t)\} = \{P_d(t)\}$$

$$\sum_{i=1}^n m_i x'_{fi} + m_0(x_0 + h_0\theta) + Q(t) = \sum_{i=1}^n P_{di}(t)$$

$$\sum_{i=1}^n m_i x'_{fi} h_i + m_0(x_0 + h_0\theta) h_0 + (\sum_{i=1}^n J_i + J_0)\theta + M(t) = \sum_{i=1}^n P_{di}(t) h_i \quad (2)$$

式中: m_i 为上部结构各质点质量; m_0 为基础质量; J_0 为基础的转动惯量; J_i 为上部结构各层质点的转动惯量; x'_{fi} 为上部结构质点的总位移; $x_f(t)$ 为上部各质点相对基础形心的位移; 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。

2 结构风振的频响函数

考虑 SSI 效应后,令 $P_d(t) = e^{i\omega t} = 1$,上部结构的水平总位移响应 x'_{fi} 可表示为^[6]

$$\begin{cases} x'_{fi}(t) = X_f(\omega) e^{i\omega t} \\ x_{0i}(t) = X_{0i}(\omega) e^{i\omega t} \\ \theta_i(t) = \theta_i(\omega) e^{i\omega t} \end{cases} \quad (3)$$

式(2)中,时域内的力 $Q(t)$ 和力矩 $M(t)$ 在地基满足各向同性和黏弹性的半空间假设时,在频域内有下列关系:

$$\begin{Bmatrix} Q(\omega) \\ M(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx}(\omega) & K_{x\theta}(\omega) \\ K_{\theta x}(\omega) & K_{\theta\theta}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X(\omega) \\ \theta(\omega) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中: $Q(\omega)$ 、 $M(\omega)$ 为时域内地基与基础间相互作用力与力矩 $Q(t)$ 、 $M(t)$ 的频域幅值; $X(\omega)$ 、 $\theta(\omega)$ 为荷载作用下,由于柔性地基变形而产生的位移 $x_0(t)$ 与转角 $\theta(t)$ 在频域内的幅值; $K_{xx}(\omega)$ 、 $K_{x\theta}(\omega)$ 为埋置基础的地基阻抗函数,其实部代表阻抗的刚度,虚部代表阻抗的阻尼。

当地土阻抗采用弹性半空间理论,基侧土阻抗

采用 Baranov 理论计算时,各阻抗的具体表达式为

$$\begin{cases} K_{hh} = \gamma_h (\alpha_h G_h r_h k_h + G_s d S_h) \\ C_{hh} = \frac{1}{\omega} (G_h r_h k_h \alpha_0 k_{11} + G_s d S_{h2}) \\ K_{h\theta} = \frac{1}{2} \gamma_\theta \alpha_\theta G_s d^2 S_h \quad C_{h\theta} = \frac{1}{2\omega} G_s d^2 S_{h\theta} \\ K_{\theta\theta} = \gamma_\theta (\alpha_\theta G_\theta r_\theta^3 k_\theta k_{21} + G_s r_\theta^2 d S_\theta + \frac{1}{3} G_s d^3 S_h) \\ C_{\theta\theta} = \frac{1}{\omega} (G_\theta r_\theta^3 k_\theta \alpha_0 k_{22} + G_s r_\theta^2 d S_{\theta 2} + \frac{1}{3} G_s d^3 S_{h2}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: G_h 、 G_θ 、 G_s 为分层基底土、侧向土的等效剪切模量; d 为基础有效埋深; α_h 、 α_θ 为有限覆盖土层厚度的修正系数; ω 为基础振动频率; S_h 、 S_θ 为侧向土的无量纲刚度阻抗; r_h 、 r_θ 为矩形基础的等效半径。

在实际计算中,需把单位幅值荷载替换成实际顺风向的脉动风荷载,作用于上部结构第 i 个质点上的顺风向风荷载表示为

$$P_{di} = A_i \omega_f(z, t) = A_i \rho \mu_{zi} \bar{v}_i(z) v_i(z, t) \quad (6)$$

式中: $\bar{v}_i(z)$ 为高度 z 处的平均风速; $v_i(z, t)$ 为高度 z 处的脉动风速,计算中风速需要对其进行傅里叶变换; μ_{zi} 为风速高度变化系数; ρ 为空气质点密度。

把式(3)、式(4)、式(6)代入式(2)中求解,若不考虑上部结构各质点间的空间相关性,则各质点位移响应和加速度响应的均方根为

$$\begin{aligned} \sigma_{x_i} &= \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |X'_f(\omega)|^2 S_v(\omega) d\omega} \\ \sigma_{\ddot{x}_i} &= \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |\ddot{X}'_f(\omega)|^2 S_v(\omega) d\omega} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $S_v(\omega)$ 为风速谱密度函数,笔者采用 Davenport 谱。

3 计算结果与分析

算例中基本风压 w_0 取 0.55 kPa,地面粗糙度为 C 类,选用延性较好的剪切型钢筋混凝土框架结构,楼面荷载标准值按 7.5 kPa 计算,柱断面取 0.6 m × 0.6 m;上部结构选用滞后阻尼,阻尼比为 0.1,层高 3 m;箱型基础,基础高 4.5 m;土的质量密度平均为 $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比取 0.3,当其他参数变化时,剪切波速取 150 m/s;埋深比(基础埋置深度与基础等效半径的比值)取 0.38。

3.1 结构在不同高度处的风振响应

为了便于对比,计算中假设各楼层的质量相同,柱的刚度(层间刚度)相同,且不随楼层而变

化. 根据算例条件,风荷载加载到顶层,分析建筑物为9、11、13、15层时结构顶层位移的动力响应,结果如图2所示.图中,刚性位移是指结构不考虑SSI效应时的顶层位移;弹性位移是指考虑SSI效

应后,结构相对基础的偏移;总位移是指考虑SSI效应后,结构弹性位移与基础平移以及结构摆动所产生位移的总和.

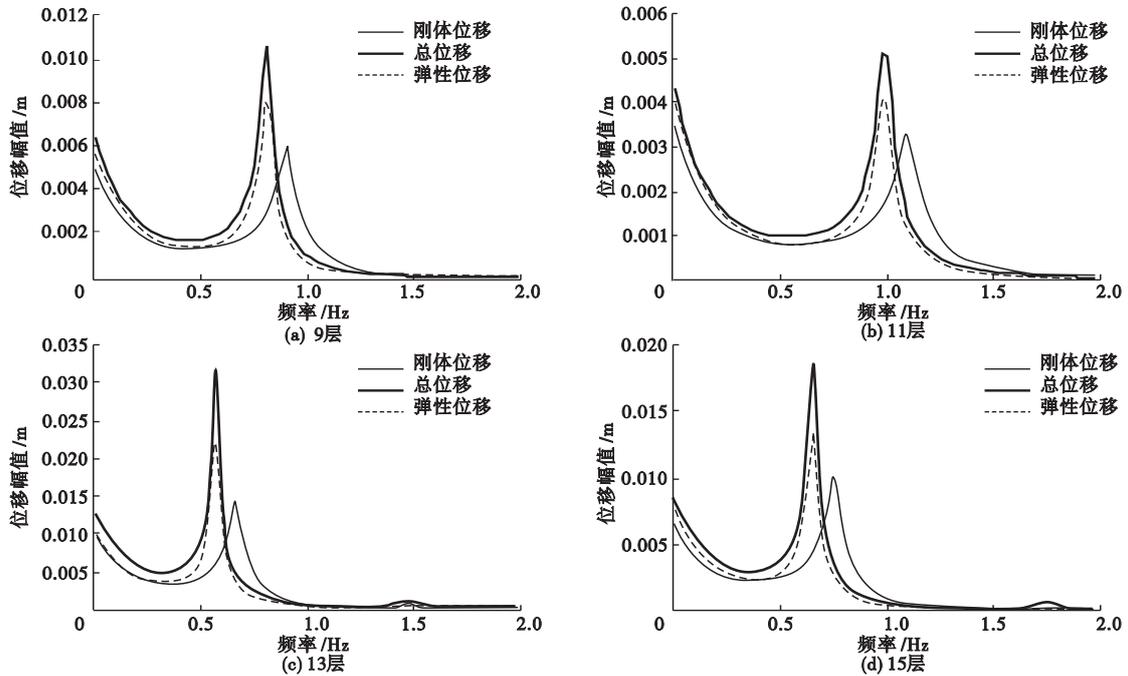


图2 不同楼层高度处结构顶层的位移传递函数

Fig. 2 Displacement transfer functions of top floor for different storey height

从图中可以看出,在频率很小时,结构顶层位移较大,当频率逐渐增大,位移随频率的增大而减小,当频率增大到一定的范围,达到结构第一自振频率左右时,结构响应急速变化,顶层位移显著增加,发生共振.随后频率继续增大超出结构自振频率,结构位移响应降低.

图2中峰值点对应结构的最大位移响应,由结构动力学可知,结构在发生共振时,位移响应最大,因此,每一个峰值点对应的值即为结构的自振频率.从图中可以看出,结构的响应以第一自振频率为主,考虑SSI效应后,体系的第一自振频率明显降低.

对结构高度略矮的建筑物(如9层),在考虑SSI效应时,结构的弹性位移和总位移比刚性位移略大,但当建筑物的楼层增加,高度增大时,弹性位移和总位移明显比刚性位移偏大,且结构越是高柔,增大的幅值越明显.当结构高度达到15层时,弹性位移增幅已接近刚性位移的50%,再考虑结构摆动的转角和基础平移,总位移已显著大于刚性位移,达到刚性位移的2倍左右.

计算得到的不同楼层处结构顶层位移和加速度的统计结果见图3.

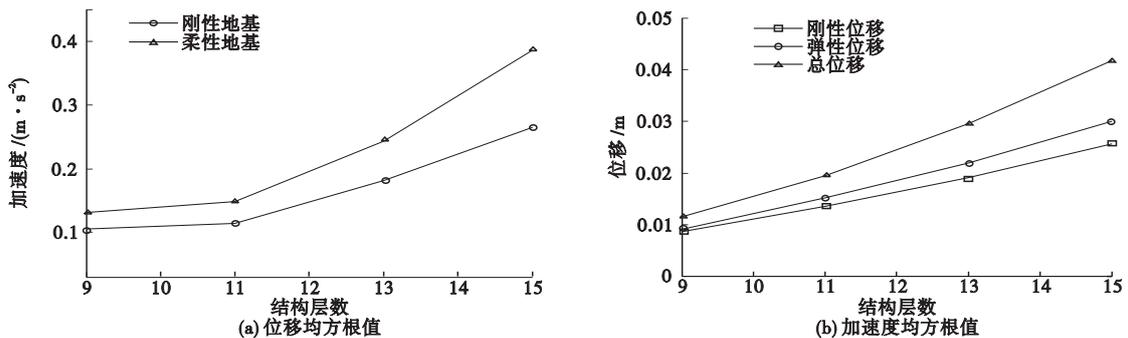


图3 不同楼层高度处结构顶层的位移和加速度均方根值

Fig. 3 RMS of roof displacement and acceleration with different story height

图 3 中结构顶层位移和加速度的均方根幅值均随结构楼层的增加而增大,在楼层较低时区别不明显;随着楼层增加,差别变大,在 15 层时,顶层总位移的均方根大约是刚性位移的 1.6 倍,超过 4 cm,而柔性地基与刚性地基的加速度均方根比值也达到 1.40.

3.2 土层剪切波速影响

地基土层特性中,一般用土的剪切波速来表示土体的软硬程度,剪切波速越大,土层越坚硬.以 15 层埋深比的框架结构为例,分析剪切波速在 100 m/s、200 m/s、300 m/s 时,结构顶层的位移响应,计算结果见图 4.

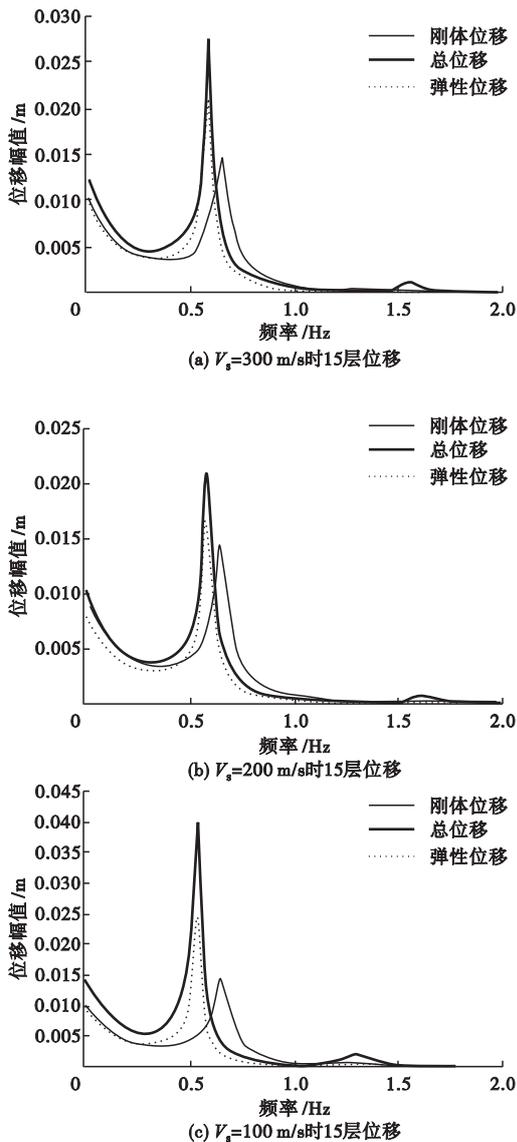


图 4 剪切波速 V_s 变化时结构顶层的位移传递函数
Fig. 4 Displacement transfer functions of top floor for different V_s

土层剪切波速变化时,15 层结构顶层的位移和加速度均方根幅值见图 5.

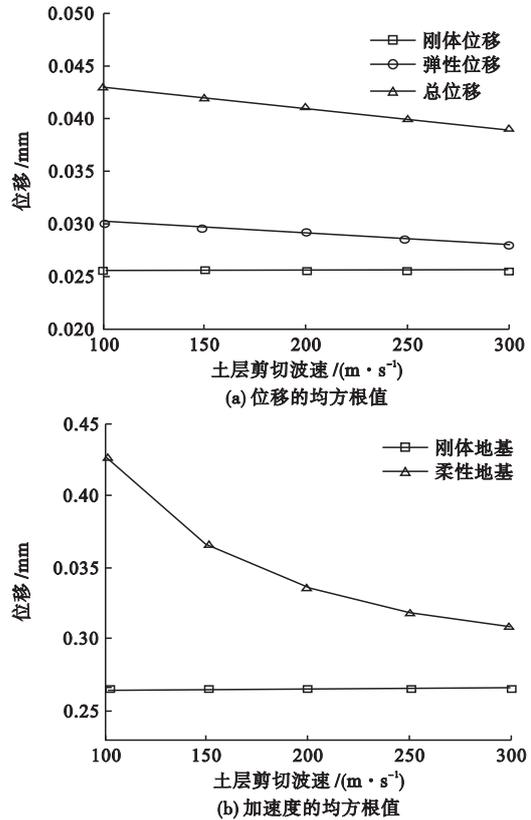


图 5 剪切波速 V_s 变化时结构顶层位移和加速度的均方根值
Fig. 5 RMS of roof displacement and acceleration with different V_s

从图 4 和图 5 可以看出,位移和加速度均随剪切波速的减小而增大,当剪切波速较大,如 $V_s = 300 \text{ m/s}$ 时,对比刚性位移,总位移均方根增大 51%,加速度均方根增加 17%;而当剪切波速逐渐减小到 $V_s = 100 \text{ m/s}$ 时,总位移均方根增幅达到 72%,加速度均方根增幅也达到 65%.另外,剪切波速减小,地基变软,结构自振频率降幅明显.

3.3 基础埋置深度影响

基础等效半径不变的情况下,仍以 15 层结构为例,土层剪切波速 $V_s = 150 \text{ m/s}$,将埋深比从 0.1 变化到 0.5,其顶层位移变化结果见图 6. 根据得到的位移幅值,计算出相应的位移和加速度的均方根幅值(见图 7).

由图 6、图 7 可以看出,埋深比对结构位移的影响明显,埋深比增大,即基础埋置深度增大,结构的位移和加速度均减小;在埋深比从 0.1 增加到 0.5 时,结构顶层总位移与刚性位移的均方根

比值从 1.83 下降到 1.39 ,加速度均方根比值从 1.51 下降到 1.27.

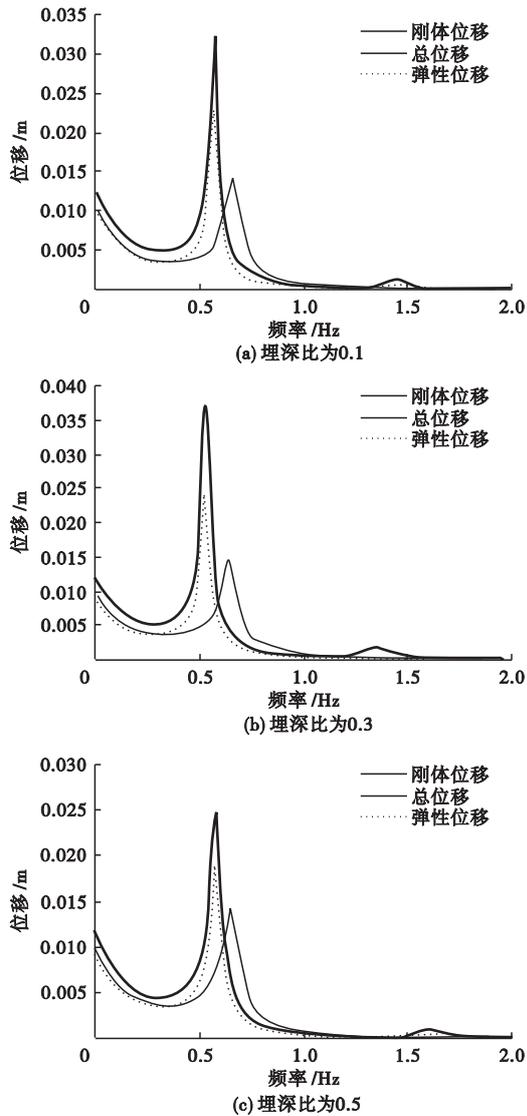
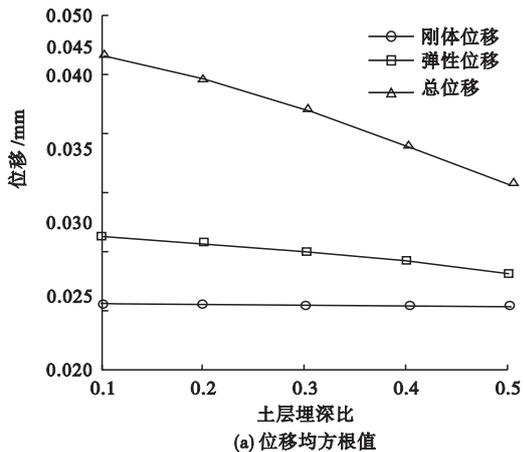
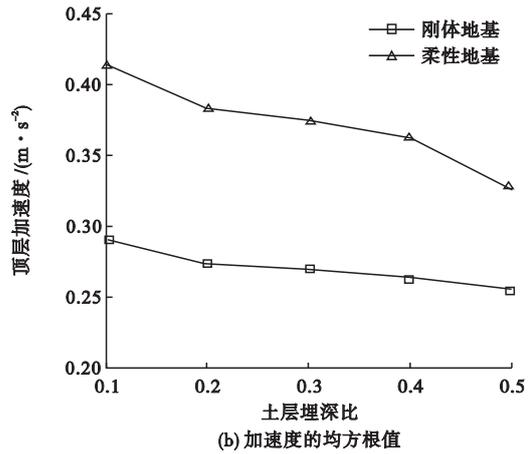


图6 埋深比变化时结构顶层的位移传递函数

Fig.6 Displacement transfer functions of top floor for different



(a) 位移均方根值



(b) 加速度的均方根值

图7 埋深比变化时结构顶层位移和加速度的均方根值
Fig.7 RMS of roof displacement and acceleration with different

4 结论

(1) 是否考虑土 - 结构相互作用 ,对结构风振响应的结果有显著的影响 ,这些影响与建筑物的高度、基础埋深以及地基条件等因素有关.

(2) 考虑土 - 结构相互作用以后 ,结构的自振频率会降低 ,对结构高度略矮的建筑物 ,在考虑 SSI 效应时 ,结构的弹性位移和总位移比刚性位移略大 ,但当建筑物的楼层增加 ,高度增大时 ,弹性位移和总位移明显比刚性位移偏大 ,且结构越高 ,增大的幅值越明显 .当结构高度达到 15 层时 ,弹性位移增幅已接近刚性位移的 50% ,再考虑结构摆动的转角和基础平移 ,总位移已显著大于刚性位移 ,达到刚性位移的 2 倍左右 .因此 ,SSI 效应使结构的位移和加速度响应增大 ,且结构越高 ,地基越软 ,埋深越浅 ,位移和加速度的增大的幅度就越明显 .

(3) 计算表明 SSI 效应对柔性地基下高层建筑的风振响应是不可忽略的.

参考文献:

[1] 范存新,陈榕,薛松涛.桩-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,2004,18(2):267-271.
(Fan Cunxin, Chen Rong, Xue Songtao. Effect of pile-soil-structure interaction on downwind response of high-rise building to wind-induced vibration [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004, 18(2):267-271.)

[2] Liu Mingyi, Chiang Weiling, Hwang Jinhung. Wind-induced vibration of high-rise building with tuned

- mass damper including soil-structure interaction [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2008 96(6-7):1092-1102.
- [3] 范存新,张毅,薛松涛,等.桩-土-结构相互作用对高层建筑风振舒适度的影响[J].振动与冲击. 2006 25(3):90-94.
(Fan Cunxin, Zhang Yi, Xue Songtao, et al. Effect of pile-soil-structure interaction on comfortable level of tall building to wind-induced vibration [J]. Journal of Vibration and Shock 2006 25(3):90-94.)
- [4] 李安勇,陈榕,薛松涛,等.考虑土-结构相互作用的高层建筑横风向振动分析[J].振动与冲击, 2008 27(10):152-155.
(Li Anyong, Chen Rong, Xue Songtao, et al. Dynamic response analysis of a high rise building subject to across-wind load considering soil-structure interaction [J]. Journal of Vibration and Shock 2008, 27(10):152-155.)
- [5] 鲍华,徐礼华,凡红,等.软土-桩-结构动力相互作用振动台模型试验研究[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版 2005 21(6):644-648.
(Bao Hua, Xu Lihua, Fan Hong, et al. Study on shaking table model test of soft soil-pile foundation-superstructure interaction system [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2005, 21(6):644-648.)
- [6] 薛素铎,刘毅,李雄彦.土-结构动力相互作用研究若干问题综述[J].世界地震工程 2013 29(2):1-9.
(Xue Suduo, Liu Yi, Li Xiongyan. Review of some problems about research on soil-structure dynamic interaction [J]. World Earthquake Engineering 2013, 29(2):1-9.)
- [7] 尚守平,邹新平,曹万林.钢框架-筏基结构与土相互作用试验研究[J].建筑结构学报, 2012 33(9):74-80.
(Shang Shouping, Zou Xinping, Cao Wanlin. Experimental investigation on soil-structure interaction of steel frame-raft foundation [J]. Journal of Building Structures 2012 33(9):74-80.)
- [8] Lin Ning, Letchford C, Tamura Y, et al. Characteristics of wind forces acting on tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2005(3):217-242.
- [9] Wong S Y, Lam K M. Effect of recessed cavities on wind-induced loading and dynamic responses of a tall building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2013, 114:72-82.
- [10] Wei Chunming, Ma Bin, Su Tingting. Research on the wind-induced vibration coefficient of transmission tower-line system [J]. Physics Procedia 2012, 24:149-154.
- [11] 李正良,魏奇科,黄汉杰,等.山地超高层建筑风振响应研究[J].振动与冲击 2011 30(5):43-48.
(Li Zhengliang, Wei Qike, Huang Hanjie, et al. Wind-induced response of super tall building in hilly terrain [J]. Journal of Vibration and Shock 2011 30(5):43-48.)
- [12] 卜国雄,谭平,张颖,等.大型超高层建筑的随机振动响应分析[J].哈尔滨工业大学学报, 2010 42(2):175-179.
(Bu Guoxiong, Tan Ping, Zhang Ying, et al. Random wind-induced response analysis of a large-scale and high-rise building [J]. Journal of Harbin Institute of Technology 2010 42(2):175-179.)
- [13] 程磊,吕西林,李培振.考虑相邻结构影响的土-结构动力相互作用研究综述[J].地震工程与工程振动 2010 30(2):32-38.
(Cheng Lei, Lü Xilin, Li Peizhen. A review of soil-structure dynamic interaction research considering dynamic cross interaction effect [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration 2010, 30(2):32-38.)
- [14] 王海,刘伟庆,王曙光,等.土-结构相互作用下消能减震结构损伤分析[J].建筑结构学报, 2012 33(10):53-58.
(Wang Hai, Liu Weiqing, Wang Shuguang, et al. Influence of soil-structure interaction on damage index of energy dissipating structure [J]. Journal of Building Structures 2012 33(10):53-58.)