

文章编号: 1673-9469 (2018) 04-0006-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.002

考虑土与结构相互作用对结构自振特性的影响

张富有, 李君艳, 李舒敏, 贺梦瑶

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究土与结构相互作用效应对结构自振特性的影响, 建立土-并联基础隔震体系计算模型, 并基于有限元单元法理论的原理, 采用 ABAQUS 软件建立不同地基条件下的普通结构和并联基础隔震结构, 探讨结构的自振频率和自振周期的变化规律。结果表明: 总体上土与结构相互作用对并联基础隔震结构自振特性的影响远小于普通结构, 场地土条件越软弱影响的程度也越大。

关键词: 并联基础隔震结构; 土与结构相互作用; ABAQUS; 自振特性

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

Influence of soil-structure interaction on the natural vibration characteristics of structures

ZHANG Fuyou, LI Junyan, LI Shumin, HE Mengyao

(College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the effect of interaction between soil and structure on the natural vibration characteristics of the structure, the calculation model of the soil - parallel foundation isolation system is established., The ABAQUS software is used to establish the common structure and the parallel base isolation structure under different foundation conditions based on the principle of finite element method. The natural vibration frequency and the law of variation of the natural vibration period is discussed. The results show that the interaction between soil and structure on the natural vibration characteristics of the parallel base isolation structure is much smaller than that of the common structure, and the weaker the soil conditions of the site, the greater the degree of influence.

Key words: parallel base isolation structure; soil-structure interaction; ABAQUS; self-vibration characteristics

我国是世界上地震活动频繁和地震灾害严重的国家之一^[1-2]。常见的隔震结构大致分为两类: 一种为在上部结构的中间层设置隔震装置的层间隔震, 另一种为目前应用较为广泛的在基础和上部结构之间设置隔震装置的基础隔震。本文采用的是应用技术较为成熟的组合隔震技术的并联隔震结构体系。并联隔震结构体系是将夹层橡胶隔震技术和摩擦滑移隔震技术并联起来复合使用, 其融合了两种支座的优点, 同时改善了单独采用一种支座的缺点, 极大提高了建筑物的抗震能力。土与结构相互作用^[3-4] (Soil- Structure Interaction, 简称为 SSI) 主要是地基土和结构基础材料的弹性模量等材料特性有很大的

差异产生的, 依据荷载性质的不同可以分为静力、动力相互作用^[5]。目前, 我国抗震主要采用的计算方法是底部剪力法、时程分析法、振型分解反应谱法等, 这些方法都是建立在刚性地基假定基础上的, 并没有考虑土与结构的协调变形而导致的基础位移^[6]。本文讨论的土与结构相互作用主要指动力相互作用, 并利用 ABAQUS 建立不考虑土与结构相互作用的普通结构和隔震结构以及中硬土、中软土和软弱土地基条件下考虑土与结构相互作用的普通结构和隔震结构, 对两种结构在不同地基条件下的自振周期和频率变化规律进行研究, 从而发现土与结构相互作用对结构自振特性的影响。

收稿日期: 2018-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51479052)

作者简介: 张富有 (1972-), 男, 河南驻马店人, 博士, 副教授, 从事工程抗震与隔震减震方面的研究。

1 土-并联隔震体系计算模型

目前,基础隔震体系的计算简化模型有单质点模型、双自由度模型和多自由度模型。本文选择双自由度模型建立并联基础隔震体系的运动方程和土-并联隔震体系计算模型。双自由度模型是将上部结构和隔震层分别等效为一个单自由度,然后确定上部结构与隔震层的地震反应,如图1。

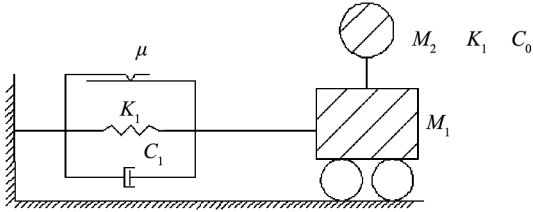


图1 双自由度并联隔震体系模型

Fig.1 Double degree of freedom parallel isolation system model

1.1 并联基础隔震体系运动微分方程

$$[M]\{\ddot{X}(t)\} + [C]\{\dot{X}(t)\} + [K]\{X(t)\} = -[M]\{I\}\ddot{X}_g(t) + \{F\} \quad (1)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & \\ & M_2 \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 \end{bmatrix}, [K] = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{bmatrix}, \{F\} = \begin{bmatrix} -\mu\lambda \sum_{i=1}^n M_i \cdot g \cdot \text{sgn}(\dot{X}_1) \\ 0 \end{bmatrix}$$

其中, M_1 为隔震层的质量, K_1 、 C_1 分别为隔震层橡胶支座的总水平刚度和阻尼, M_2 、 K_2 、 C_2 为上部结构总质量、总水平刚度和总层间阻尼。

1.2 建立土-并联隔震体系模型

在双自由度并联隔震计算模型的基础上,建立土-并联基础隔震体系模型时,假定地基均质、各向同性的弹性空间,地基可用直观、简单的线性粘弹性模型进行模拟,如图2所示,仅考虑基础的水平移动和竖向转动,因其耦合作用微小而不予考虑,用弹簧和阻尼分别代表地基的柔度和耗能特性^[7]。此时,计算模型为三质点模型,动力微分方程为:

$$[M]\{\ddot{X}(t)\} + [C]\{\dot{X}(t)\} + [K]\{X(t)\} = -[M]\{I\}\ddot{X}_g(t) + \{F\} \quad (2)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_0 \\ & M_1 \\ & & M_2 \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} C_0 + C_1 & -C_1 & 0 \\ -C_1 & C_1 + C_2 & -C_2 \\ 0 & -C_2 & C_2 \end{bmatrix},$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_0 + K_1 & -K & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{bmatrix}, \{F\} = \begin{bmatrix} -\mu\lambda \sum_{i=1}^n M_i \cdot g \cdot \text{sgn}(\dot{X}_1) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

其中, M_0 为基础质量, K_0 、 C_0 分别表示地基的等效水平刚度和阻尼, K_θ 、 C_θ 分别表示地基的等效转动刚度和阻尼。

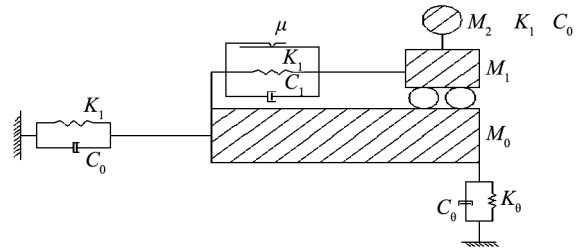


图2 土-并联基础隔震体系简化计算模型

fig.2 simplified calculation model of soil-parallel foundation isolation system

由弹性半空间理论可知,粘弹性地基模型的参数与基础等效半径 r 、土的密度 ρ 、剪切波速有关,计算公式如下。在进行简化计算时,可以通过输入不同的土体剪切波速来表示场地类别^[8]。

$$K_0 = 4.4AV_s, K_\theta = 2.3AV_s r^2, A = \rho V_s r \\ C_0 = 2.7Ar, C_\theta = 0.31Ar^3, r = 0.55\sqrt{ab} \quad (3)$$

2 计算模型

2.1 模型参数

本文选取的上部计算模型为6层的混凝土框架结构,结构长宽均为12 m,层高为3.6 m,总高度为21.6 m。梁柱尺寸分别为400 mm×600 mm和500 mm×500 mm,隔震层顶板厚度为160 mm,其余楼板厚度为120 mm。结构基础采用筏式基础,厚度1 m。结构混凝土材料选用C35,密度为2 500 kg/m³,弹性模量3.15×10⁴ MPa。进行混凝土材料的动力计算时,有关研究^[9]表明,混凝土的动弹性模量比静弹性模量高出约20%~40%,本文取动弹性模量为静弹性模量的1.2倍。抗震设防烈度为7度(0.10 g),设计基本地震分组为第一组。场地土截取范围为10D(D为建筑物的横向尺寸),即土体长,宽皆为120 m。

将中硬土、中软土和软弱土地基条件分别以Ⅱ、

Ⅲ、Ⅳ表示,分别建立不同地基条件考虑土与结构相互作用的普通结构和并联基础隔震结构和考虑土与结构相互作用的普通结构和并联基础隔震结构。各个模型简称如表 1。

2.2 ABAQUS 建立模型

在保证计算精度以及合理控制计算单元数量和计算时间的要求下,在建立有限元模型时,框架的梁和柱采用 TimoshenkB31 梁单元,楼板采用壳单元 S4R 单元简化,赋予真实厚度,筏板基础采用 C3D8R 实体单元建模,地震响应计算中采用 Rayleigh 阻尼,土体材料服从摩尔-库伦屈服准则。如图 3—6 所示。

3 自振特性分析

根据 ABAQUS 模拟结果,将不考虑土与结构相互作用的普通结构(OS)和并联基础隔震结构(BIS)以及中硬土、中软土和软弱土地基条件下考虑土与结构相互作用的普通结构(Ⅱ~Ⅳ-OS-土与结构相互作用)和隔震结构(Ⅱ~Ⅳ-BIS-土与结构相互作用)8 个模型的前五阶自振周期列于表 2,不同模型前五阶自振频率比较如图 7 所示。表 2 中的第一周期土与结构相互作用效应影响率计算公式如式(4)所示:

土与结构相互作用效应影响率 =

考虑 SSI 效应的模型 - 刚性地基的模型

考虑 SSI 效应的模型

× 100% (4)

表 1 不同模型简称
Tab.1 Abbreviation of different models

普通结构		并联基础隔震结构	
地基条件	简称	地基条件	简称
刚性地基	OS	刚性地基	BIS
中硬土地基	Ⅱ -OS- 土与结构相互作用	中硬土地基	Ⅱ -BIS- 土与结构相互作用
中软土地基	Ⅲ -OS- 土与结构相互作用	中软土地基	Ⅲ -BIS- 土与结构相互作用
软弱土地基	Ⅳ -OS- 土与结构相互作用	软弱土地基	Ⅳ -BIS- 土与结构相互作用

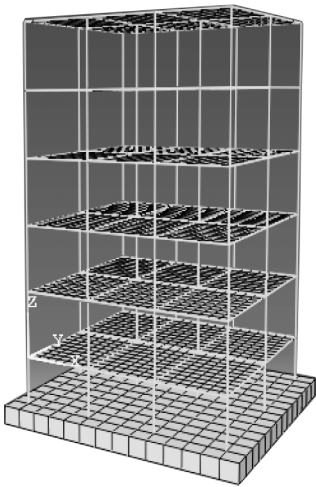


图 3 普通结构三维模型
Fig.3 General structure 3d model

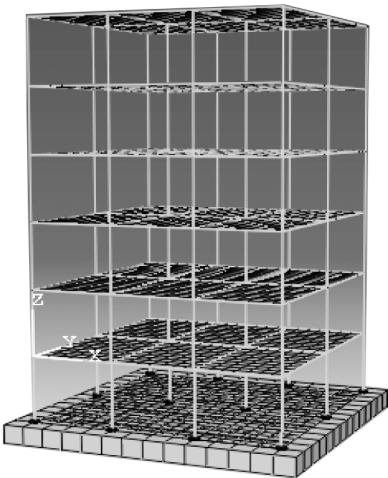


图 4 并联基础隔震结构三维模型
Fig.4 Parallel isolation structure 3d model

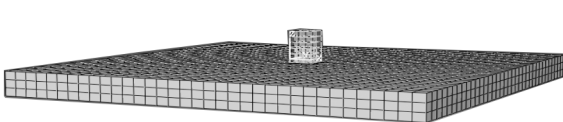


图 5 土 - 普通结构体系相互作用三维模型
fig. 5 3d model of interaction between soil and general structure system

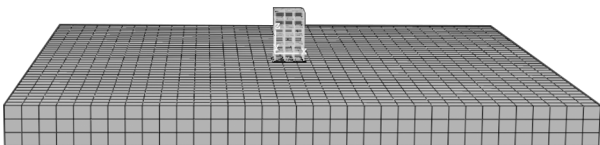


图 6 土 - 并联基础隔震体系相互作用三维模型
fig. 6 3d model of interaction between soil and parallel isolation structure system

由表 2 和图 7 所示,对于普通结构,刚性地基条件下体系的自振周期与考虑土与结构相互作用效应的自振周期的误差随着土体越软弱越大,软弱地基时,第一阶周期的土与结构相互作用效应影响率可以达到 10%,从图 7(a)可以看出,考虑土与结构相互作用效应的结构 OS- II、OS- III 自振频率和结构 OS 的误差不大,曲线基本拟合,而结构 OS- IV 和 OS 的前五阶自振频率曲线相差有一定的幅度。由此可知,场地条件为较好的中硬土和中软土地基对普通结构的自振频率影响较小,而为软弱土地基时对结构的自振频率有一定的影响,在进行计算时,需要考虑土与结构相互作用效应的影响。

而对于并联基础隔震结构,刚性地基条件下体系的自振周期与考虑土与结构相互作用效应的自振周期的误差虽然也随着土体越软弱越大,但相对来说相差较少,第一阶周期最大的土与结构相互作用效应的影响率为在软土地基条件下的 0.7%,而且也

远小于普通结构在中硬土地条件下最小的影响率的 1.6%。从图 7(b)可以看出刚性地基条件下并联基础隔震结构的前三阶自振频率与考虑土与结构相互作用效应的三个模型误差很小;曲线是基本拟合的,而后两阶自振频率则随着场地土条件越差,误差的幅度越大。由此可知,土与结构相互作用效应对并联基础隔震结构计算主要考虑的前三阶自振频率影响较小,基本上可以忽略其影响,但对于场地条件较差的软土地基,最好仍需考虑土与结构相互作用效应的影响。

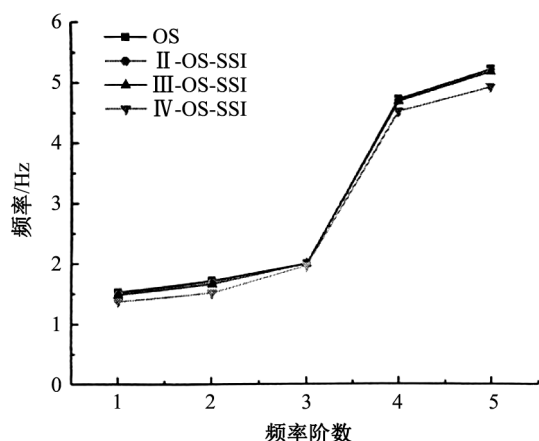
4 结论

1) 随着场地土条件由硬到软(弹性模量越来越小),考虑土与结构相互作用的普通结构和并联基础隔震结构的自振频率都越来越小,自振周期越来越大。

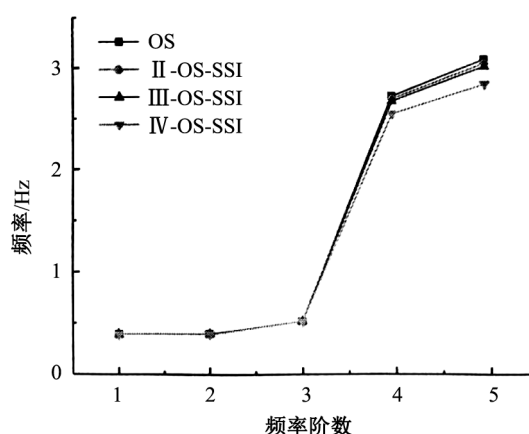
表 2 各模型前五阶自振周期

Tab.2 The first five natural vibration periods of each model

模型	自振周期 /s					第一周期影响率	场地特征周期 /s
	1	2	3	4	5		
普通结构	OS	0.656	0.587	0.505	0.212	0.191	—
	II -OS-SSI	0.667	0.598	0.506	0.212	0.192	1.6%
	III -OS-SSI	0.675	0.607	0.505	0.213	0.193	2.8%
	IV -OS-SSI	0.729	0.665	0.514	0.221	0.203	10%
基础隔结构	BIS	2.553	2.538	1.950	0.369	0.325	—
	II -BIS-SSI	2.556	2.541	1.950	0.373	0.330	0.1%
	III -BIS-SSI	2.558	2.543	1.951	0.376	0.333	0.2%
	IV -BIS-SSI	2.571	2.556	1.953	0.395	0.354	0.7%



(a) 普通结构前五阶频率对比



(b) 并联基础隔震结构前五阶频率对比

图 7 不同模型前五阶周期对比

fig.7 comparison of the first five natural vibration periods of different models

2) 刚性地基条件下体系的自振周期最小, 软弱土地基条件下的自振周期最大。

3) 无论是否考虑土与结构相互作用效应的普通结构的第一阶周期都和抗震规范规定的场地特征周期很接近, 在地震时容易发生共振, 造成严重的震害。

4) 无论是否考虑土与结构相互作用效应的并联基础隔震结构的第一阶周期均大幅避开了场地特征周期, 能够有效地减轻结构地震反应, 达到良好的隔震效果。

总体来说, 通过比较分析个模型的前五阶自振频率和周期, 发现考虑土与结构相互作用效应对普通结构自振特性的影响远大于并联基础隔震结构的自振特性, 且场地土的条件越差影响的程度也越大。

参考文献:

- [1] 张培震. 中国地震灾害与防震减灾 [J]. 地震地质, 2008, 30(3): 577-583.
- [2] 薛素铎, 赵均, 高向宇. 建筑抗震设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

- [3] PARMELEE R A. Building-foundation interaction effects during earthquakes[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1967, 93: 131-152.

- [4] NOVAK M, HENDRESON P. Base-isolated building with soil-structure interaction[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989, 18(6): 751-765.

- [5] 于旭, 庄海洋, 朱超. 基于模型试验的软夹层与刚性地基上隔震结构体系耗能特性分析 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(10): 73-82.

- [6] 杨高中. 刚性地基上梁桥震害与分析 [J]. 华东公路, 1981(S1): 17-43.

- [7] 李慧, 王亚楠, 杜永峰. 土-结构动力相互作用对基础隔震结构的影响 [J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(1): 75-81.

- [8] 李国豪. 工程结构抗震动力学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.

- [9] 郑永来, 周橙, 黄炜, 等. 动态弹性模量的实验研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1998(2): 31-35.

(责任编辑 王利君)

(上接第5页)

32(9): 1616-1621.

- [6] 沈世钊, 武岳. 结构形态学与现代空间结构 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 1-10.

- [7] HU X, CHEN X, ZHZO Y, et al. Optimization design of satellite separation systems based on Multi-Island Genetic Algorithm[J]. Advances in Space Research, 2014,

53(5): 870-876.

- [8] CHEN H, OOKA R, KATO S. Study on optimum design method for pleasant outdoor thermal environment using genetic algorithms (GA) and coupled simulation of convection, radiation and conduction[J]. Building & Environment, 2008, 43(1): 18-30.

(责任编辑 王利君)