

文章编号: 1004- 4574(2009) 03- 0146- 07

土-结构相互作用对铅芯橡胶支座隔震结构的影响

于 旭^{1,2}, 宰金珉¹, 王志华¹

(1. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009 2 南京工程学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211167)

摘 要: 利用有限元方法, 将隔震结构、基础和土体作为一个整体系统进行分析, 研究了不同土性土-结构相互作用对基底地震动输入和隔震体系动力特性与地震响应的影响。分析结果表明, 土-结构相互作用对基础隔震结构存在影响, 因而在工程设计中, 隔震结构不应忽略土-结构相互作用效应的影响。

关键词: 基底隔震; 土-结构相互作用; 地震响应; 有限元分析

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

Effect of soil-structure interaction on lead core rubber bearing isolations structure

YU Xu^{1,2}, AI Jin-ming¹, WANG Zhi-hua¹

(1 Nanjing University of Technology, Department of Civil Engineering Nanjing 21009, China

2 Nanjing Institute of Technology, Department of Civil Engineering Nanjing 211167, China)

Abstract This paper proposes a way to analyze the base isolated structure, foundation and soil mass as a whole system by means of the finite element methods, the effect of soil-structure interaction (SSI) with various soils on the seismic input of the foundation, the dynamic characteristics and seismic response of the isolation system are studied. The results indicate that SSI has an influence on base isolated structure and in engineering design of isolated structure, designers should not ignore the influence of SSI effect.

Key words base isolation; soil-structure interaction (SSI); earthquake response; finite element analysis

基础隔震体系是一种合理、有效、安全、经济的减震体系, 目前在各类建筑中应用广泛。它采用在建筑的基础和上部结构之间设置柔性隔震层, 延长上部结构的基本周期, 从而避开地面地震动的主频带范围, 减免共振效应, 减小结构的地震反应。

由于现有的抗震设计都采用刚性地基的假定, 忽略土-结构动力相互作用 (简称 SSI)。然而在实际地震时, 由于地基的柔性和无限性, 使得按刚性地基假定计算出来的结构动力特性和动力反应与将地基和结构作为一个整体计算出来的结果有较大差别; 另外, 将地基与结构作为一个体系进行分析, 输入到建筑物的地震动的特性受到震源特性、场地特性以及建筑物、基础与地基相互作用的影响, 使得输入到建筑物的地震动特性与刚性地基假定的有很大不同^[1]。因而, 研究隔震体系时, 有必要考虑土-结构动力相互作用对其隔震效果的影响。

近年来在土-隔震结构体系的地震反应研究方面, 李忠献等人采用频域分析方法, 分析总结了土-结构

收稿日期: 2008- 11- 20 修订日期: 2009- 02- 13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50678083)

作者简介: 于旭 (1977-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程研究. E-mail: gx6307@126.com

动力相互作用对滑动隔震结构的影响^[2]; Constantinou 等人对单自由度上部结构的基础隔震问题给出了考虑 SSI效应的分析,并以体系基频的变化程度作为辨别 SSI效应对隔震体系的影响标识^[3];潘开名等人通过对带有叠层橡胶支座隔震结构的减震台的观测,建立了一个地基结构动力相互作用的计算模型,计算减震台台面的地震响应,并把计算结果与观测结果进行比较分析^[4]。

本文针对铅芯橡胶支座隔震结构,采用 ABAQUS软件,建立了将土体-桩基-隔震结构视为共同工作整体的三维有限元模型,通过对不同场地条件下隔震体系的数值模拟计算,分析了不同土性的 SSI对地震动输入的影响规律,同时进一步对比分析了不同土性的 SSI对隔震体系的动力特性、地震响应和隔震效果的影响,为铅芯橡胶支座隔震结构的合理设计提供参考。

1 计算模型的建立

本文研究的基础隔震体系为:上部结构为 10层钢框架,总高度 42m,柱采用方钢管柱,截面尺寸为 600mm × 600mm × 10mm,梁采用工字钢,截面尺寸为 450mm × 150mm × 11.5mm × 18mm,楼板厚 120mm,基础采用桩基础,桩长 12m,桩径 500mm × 500mm,地基考虑单层土,土层厚度 50m,土体的动本构关系采用记忆型嵌套面动力本构模型模拟^[5],考虑到隔震结构适用于除第四类场地土之外的 3种场地土,本文考虑 3种场地土对基础隔震结构的影响,其本构关系模型参数见表 1;采用铅芯橡胶隔震支座进行基础隔震,其性能参数见表 2;采用双折线模型模拟上部结构钢材的本构关系,应力-应变关系见图 1;桩基础及其承台板弹性模量为 $3.0 \times 10^4 \text{MPa}$

表 1 记忆型粘塑性本构模型参数

Table 1 Parameters of memory type viscoplastic constitutive model

土层	密度 $\rho/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	剪切波速 $V_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	泊松比	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
第一类场地土	1.93	550	0.49	21
第二类场地土	2.05	310	0.49	30
第三类场地土	1.78	155	0.49	16

表 2 铅芯橡胶隔震支座性能参数

Table 2 Performance parameters of lead plug rubber bearing

支座参数	直径 /mm	铅芯直径 /mm	橡胶总厚度 /mm	弹性模量 $E/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	第 1形状系数	第 2形状系数
参数值	600	70	120	0.4	25.5	5.0

有限元建模中,土体用实体单元 C3D8R 模拟,梁、柱采用杆单元模拟,隔震支座采用 SPRING 单元模拟,桩及承台采用实体单元 C3D8 模拟,地基考虑自由远置边界,地基宽度取结构横向尺寸的 10倍^[6-7],采用接触面对来模拟土与桩基础接触面间的动力学传递特性^[8]。三维有限元模型如图 2所示。计算中,基岩水平向输入地震波采用 NJ人工波,加速度峰值为 0.1g,其加速度时程及其反应谱如图 3、4所示。

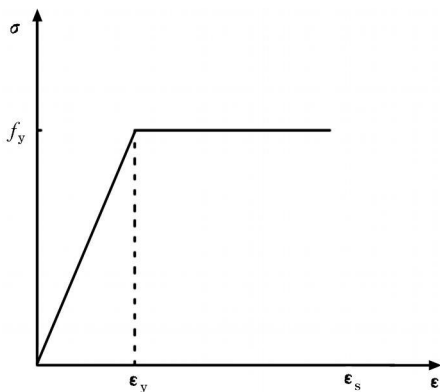


图 1 钢材应力-应变关系

Fig 1 Stress-strain relationship of steel

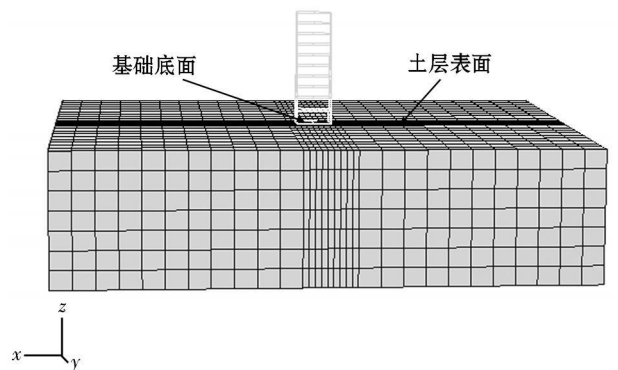


图 2 基础隔震体系三维有限元模型

Fig 2 Three-dimensional finite element model of base isolation system

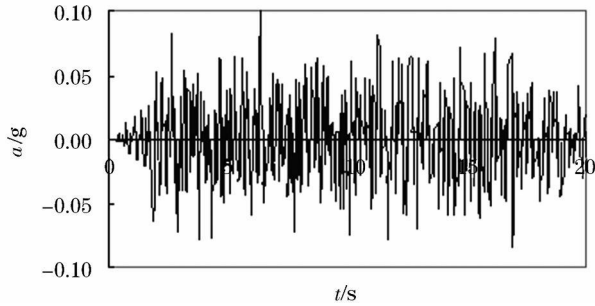


图 3 基岩输入地震动加速度时程

Fig 3 Acceleration history of ground motion input from bedrock

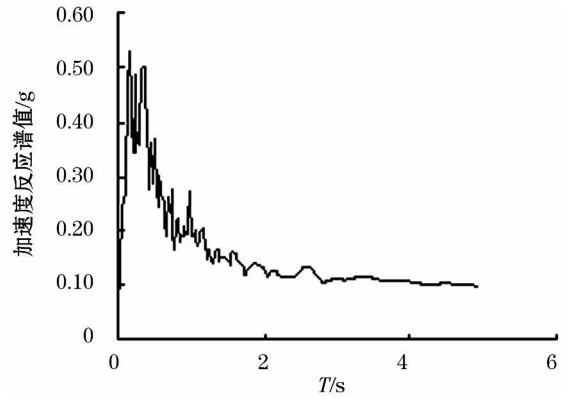


图 4 基岩输入地震动加速度反应谱

Fig 4 Acceleration response spectrum of ground motion input from bedrock

2 不同土性 SSI对地震动输入的影响

从基岩输入的地震动经过土层介质后传到基础底面时其频谱特性将明显地改变,同时土-结构动力相互作用也将改变传到基础底面的地震动频谱特性。图 5-7 给出了不同场地土下,隔震结构基础底面(桩基础承台底)、土层表面的加速度和基岩输入加速度的反应谱,可以看出,基岩地震动经场地传播后得到的土层表面的加速度反应谱的特征周期随场地类别的增大而变大,即场地土越软,地表加速度反应谱的特征周期将越大。但基础底面和土层表面的加速度反应谱所对应加速度有一定差异,一类场地下,基础底面和土层表面的加速度反应基本相同,二类场地下,在短周期范围内,土层表面的加速度反应明显高于基础底面的加速度反应,而三类场地下,长周期范围内,土层表面的加速度反应明显高于基础底面的加速度反应。以上分析表明,场地条件对基岩地震动输入具有滤波作用,基岩地震动经场地传播后得到的土层表面的地震动加速度反应谱的特征周期随场地的自振周期增大而变大,即一类场地到三类场地特征周期值越来越大,且三类场地上在长周期段加速度反应谱所对应的加速度值大于其它两类场地的值,说明三类场地上长周期结构将受到更大的地震作用,相反,在短周期的硬土地场(如二类场地)上短周期结构将受到更大的地震作用。

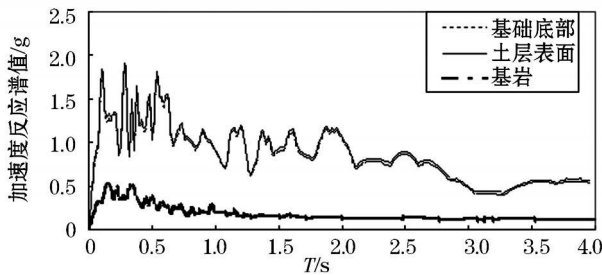


图 5 一类场地下基础底面、土层表面和基岩的加速度反应谱

Fig 5 Acceleration response spectra of bottom of foundation, surface of soil and bedrock under site of kind I

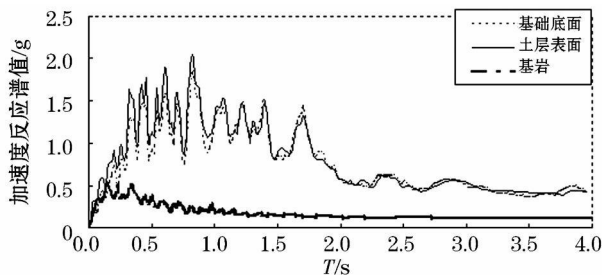


图 6 二类场地下基础底面、土层表面和基岩的加速度反应谱

Fig 6 Acceleration response spectra of bottom of foundation, surface of soil and bedrock under site of kind II

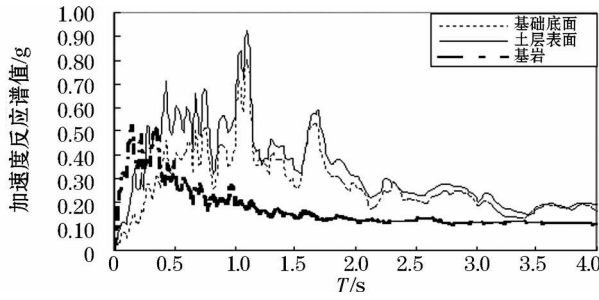
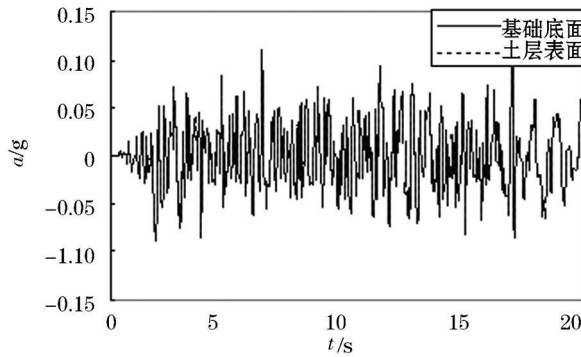


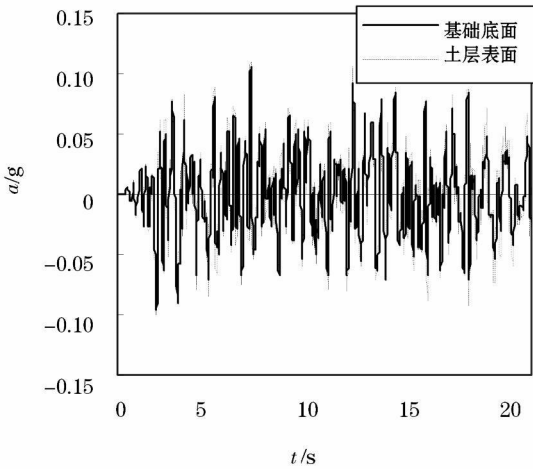
图 7 三类场地下基础底面、土层表面和基岩的加速度反应谱

Fig 7 Acceleration response spectra of bottom of foundation, surface of soil and bedrock under site of kind III

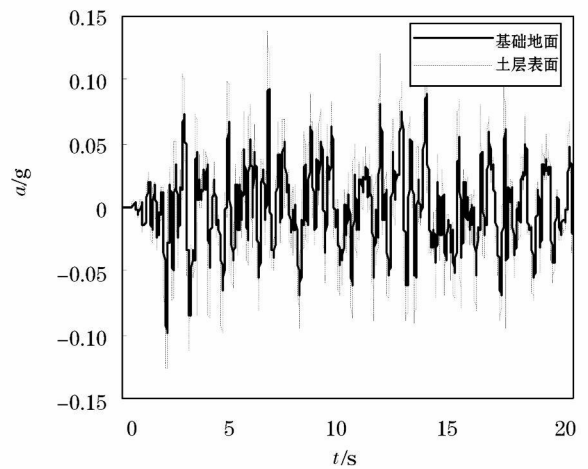
图 8 给出了不同场地下基础底面和土层表面加速度时程,可以看出,一类场地下,基础底面和土层表面的加速度峰值基本相同,二类场地和三类场地下,基础底面的加速度峰值均小于土层表面的加速度峰值,其中三类场地最为明显,这表明场地越软,土-结构动力相互作用对基础底面地震动的影响越大,文献 [9]通过结构-地基动力相互作用体系振动台模型试验也有类似结论,即基底有效地震动小于自由场地震动。



(a)一类场地



(b)二类场地



(c)三类场地

图 8 不同场类地下基础底面和土层表面加速度时程

Fig 8 Acceleration history of bottom of foundation and surface of soil under different kinds of site

3 不同土性 SSI对隔震结构体系动力特性的影响

表 3 不同类场地下隔震结构与非隔震结构的一阶自振频率对比

Table 3 Comparison of first order natural frequency between isolation structure and non-isolation structure for different kinds of site Hz

工况	一类场地	二类场地	三类场地
考虑 SSI基础隔震	0.41	0.39	0.37
考虑 SSI基础未隔震	1.82	1.56	0.87

表 4 不同类场地地下隔震结构与非隔震结构的三阶自振频率对比

工况	一类场地	二类场地	三类场地
考虑 SSI基础隔震	0.58	0.56	0.54
考虑 SSI基础未隔震	4.43	3.62	1.21

表 5 不同类场地地下隔震结构与非隔震结构的四阶自振频率对比

工况	一类场地	二类场地	三类场地
考虑 SSI基础隔震	2.46	2.44	2.42
考虑 SSI基础未隔震	5.56	4.89	2.9

从表 3可以看出,考虑 SSI效应时,隔震结构与非隔震结构随场地土类别的增大自振频率减小,但减小的幅度差异较大,隔震结构的最大降幅仅为 15%,而未隔震结构的最大降幅达到 43%,这一特性在表 4 表 5中更加显著,表明隔震结构在考虑 SSI效应时整个隔震体系进一步变柔,隔震体系自振频率减小,但减小幅度较小。由前面的分析可知,三类场地上,土层表面和基础底面加速度反应谱的特征周期将出现长周期化,而考虑 SSI效应时整个隔震体系的自振频率变化较小,仍为长周期结构,因此,隔震结构在三类场地上可能受到较大的地震作用。其次,考虑 SSI效应时,在一类场地和二类场地上,隔震结构与未隔震结构自振频率差异较大,而在三类场地上差别较小,而隔震结构的原理是通过设置隔震层减小上部未隔震结构的自振频率,从而避开地面地震动的主频带范围,以减小上部结构的地震反应,由此可进一步得出:在一类场地和二类场地上,隔震结构隔震效果较好,而三类场地上,隔震结构隔震效果将减弱。

4 不同土性的 SSI效应对隔震结构地震响应的影响

4.1 楼层加速度反应

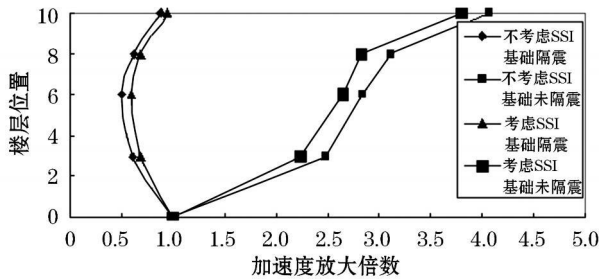


图 9 一类场地上楼层加速度放大倍数

Fig 9 Amplifications of acceleration of floor levels on first kind of site

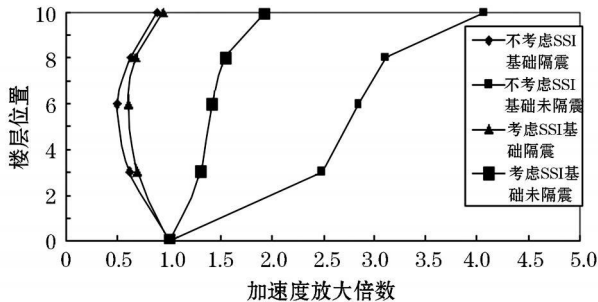


图 10 二类场地上楼层加速度放大倍数

Fig 10 Amplification of acceleration of floor levels on second kind of site

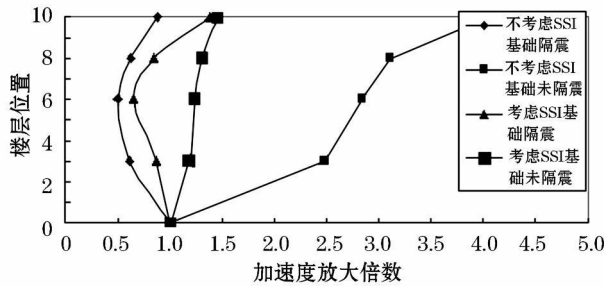


图 11 三类场地上楼层加速度放大倍数

Fig 11 Amplification of acceleration of floor levels on third kind of site

楼层加速度放大倍数能集中反应上部结构对基底输入加速度的放大或缩小,此处对不同场地上以及是否考虑相互作用 4种情况下的加速度放大倍数进行比较。图 9~图 11分别为一类场地、二类场地和三类场地上楼层加速度放大倍数。从图 9图 10可以看出,在一类场地和二类场地条件下,隔震结构的楼层加速度放大倍数在考虑 SSI效应与不考虑 SSI效应时均比较接近,而在三类场地上,隔震结构考虑 SSI效应时的楼层加速度放大倍数明显高于不考虑 SSI效应时的隔震结构楼层加速度放大倍数,尤其是在顶层,加速度放大倍数达到 1.38,与考虑 SSI效应基础未隔震时接近,可见,一类场地和二类场地对隔震结构的隔震效果影响较小,而三类场地下隔震结构的隔震效果下降。其次,从图 11还可以看出,对于未隔震结构,在三类场地上,考虑 SSI效应时楼层加速度放大倍数明显减小,表明三类场地上,考虑 SSI效应对未隔震结构具有减震效果。上述变化规律表明,三类场地上考虑 SSI效应后,隔震性能降低,不能忽略 SSI效应的影响。

4.2 层间位移反应

图 12~图 14给出了一类场地、二类场地和三类场地上结构层间位移反应(楼层 0代表隔震层),在考虑 SSI效应时,一类场地和二类场地上结构隔震前后的层间位移明显减小,而在三类场地条件下,考虑 SSI效应未隔震结构的层间位移接近考虑 SSI效应隔震结构的层间位移,其次,在二类场地和三类场地条件下,考虑 SSI效应隔震结构的层间位移要高于不考虑 SSI效应隔震结构的层间位移,而在一类场地条件下,考虑 SSI效应对隔震结构层间位移影响较小。上述分析表明:在软弱地基(相应于三类场地)上,考虑 SSI后隔震结构的层间位移增大变化较快,即软弱地基对隔震效果的降低作用十分显著;而在中硬~坚硬地基上(相应于一类场地和二类场地),考虑 SSI效应对隔震结构层间位移影响较小,即中硬~坚硬地基上隔震结构隔震效果较好。

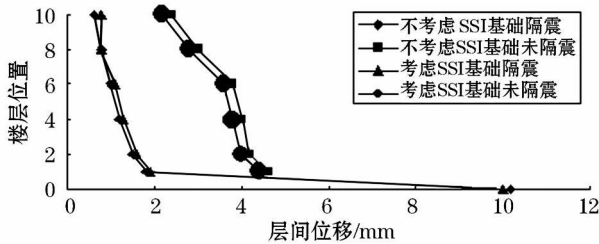


图 12 一类场地上结构层间位移反应

Fig 12 Inter-story drift response of structure on first kind of site

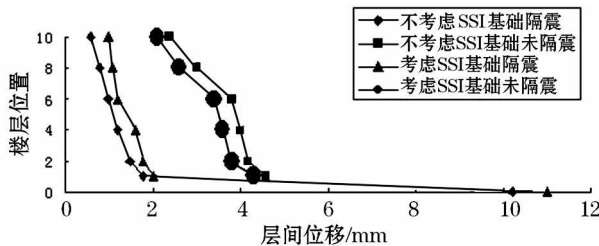


图 13 二类场地上结构层间位移反应

Fig 13 Inter-story drift response of structure on second kind of site

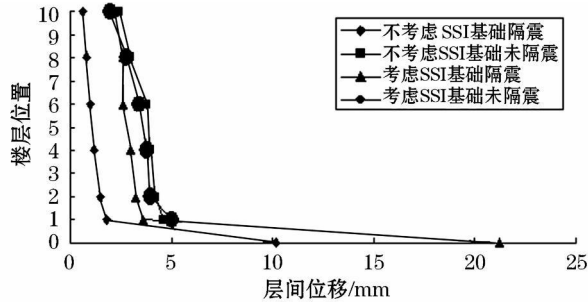


图 14 三类场地上结构层间位移反应

Fig 14 Inter-story drift response of structure on third kind of site

5 结论

(1) 场地条件对基岩地震动输入具有滤波作用, 基岩地震动经场地传播后得到的地面地震动加速度反应谱的特征周期随场地的自振周期增大而变大; 受土 - 结构动力相互作用的影响, 基础底面地震动小于自由场地地震动, 尤其是在三类场地条件下最为明显。

(2) 在考虑 SSI 效应时整个隔震体系进一步变柔, 隔震体系自振频率减小, 但减小幅度较小。与未隔震结构相比, 在一类场地和二类场地上, 隔震结构与未隔震结构自振频率差别较大, 三类场地上差别较小。

(3) 考虑 SSI 效应时, 隔震结构的地震响应比不考虑 SSI 效应时有所增大, 尤其是在三类场地上隔震结构的楼层加速度放大倍数和层间位移反应均大幅增加。即三类场地下考虑 SSI 效应后, 隔震性能降低, 不能忽略 SSI 效应的影响。

参考文献:

[1] 朱玉华, 吕西林. 组合基础隔震系统地震反应分析 [J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 76- 81

[2] 李忠献, 刘 颖, 王 健. 滑移隔震结构考虑土 - 结构动力相互作用的动力分析 [J]. 工程抗震, 2004 3 (4): 1- 6

[3] Constantinou M C, Kneifati M. Dynamics of Soil- Base- Isolated- Structure Systems [J]. J Struc Engrg., ASCE, 1988 114 (1): 211- 221.

[4] 潘开名, 刘斌, 等. 叠层橡胶支座隔震结构地基 - 结构动力相互作用分析 [J]. 东北大学学报, 2002, 23(01): 71- 74

[5] 庄海洋, 陈国兴, 朱定华. 土体动力粘塑性记忆型嵌套面本构模型及其验证 [J]. 岩土工程学报, 2006 28(10): 1267- 1272

[6] 楼梦麟, 陈清军. 侧向边界对桩基地震反应影响的研究 [M]. 上海: 同济大学, 1999.

[7] 楼梦麟, 王文剑, 朱彤. 土 - 结构体系振动台模型试验中土层边界影响问题 [J]. 地震工程与工程振动, 2000 20(2): 30- 36.

[8] By ABAQUS Inc ABAQUS Analysis User's Manual [CP]

[9] 陈跃庆. 不同土性的 SSI 体系振动台试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2003