

SSI效应对隔震结构地震响应的影响分析

于旭^{1,2} 宰金珉² 庄海洋²

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

摘要:通过对刚性地基和土性地基上隔震结构体系振动台模型试验的数据进行对比分析,研究了土-结构动力相互作用(SS I)对隔震结构地震响应的影响规律。研究表明:SS I效应对隔震结构基底地震动影响较大,隔震结构基底地震动的峰值小于自由场地地震动的峰值,其频谱组成与自由场地地震动不完全相同。SS I效应对隔震结构楼层加速度反应有明显影响,SS I效应使隔震结构楼层加速度放大倍数较刚性地基时增大。楼层加速度组成分量中隔震层转动引起的摆动分量是导致土性地基上隔震结构楼层加速度反应增大的主要因素之一。

关键词:振动台模型试验; 隔震结构; 土-结构相互作用; 地震

中图分类号: TU311

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2011)06-0846-06

Effects of Soil-Structure Interaction on Earthquake Response of Isolated Structure System

Yu Xu^{1,2}, Zai Jinming², Zhuang Haiyang²

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, 210009, China;

2. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, 211167, China)

Abstract: Through analyzing the data of shaking table model tests of isolated structure on fixed ground base and soil ground base, the effects patterns of soil-structure interaction(SS I) on dynamic characteristic and earthquake response of isolated structure are studied. The results show that effects of SS I on foundation motion of isolated structure are great, the peak value of foundation motion is smaller than that of the free field, and the spectral component of foundation motion is different. Effects of SS I on acceleration amplification factors of floors of isolated structure are significant, and the acceleration amplification factors of floors is greater than those on fixed ground base. One of main factors leading to the acceleration response of floors increasing is swing motion caused by rotation of isolated layer, which is the constitutions of acceleration amplification factors of floors.

Key words: shaking table model test; isolated structure; soil-structure interaction; earthquake

隔震结构一般支承于土层地基上,土-结构动力相互作用(Soil structure interaction, SS I)是客观存在的,考虑土-结构动力相互作用时,隔震体系的刚度和阻尼等参量将改变,结构的动力特性将发生变化,结构地震响应与刚性地基假设下的结果将出现差异,这可能导致在刚性地基假定下设计的隔震建筑在实际土层地基下并未体现出较好的隔震效果^[1]。日本现行《隔震结构设计规范》指出隔震结

构建在软弱场地的情况下,地震动出现长周期化的同时,建筑物-地基的相互作用对输入地震波特性和有可能产生相当大的影响^[2]。近些年来,考虑 SS I效应的隔震结构体系研究中,李延涛、李忠献等人研究了土-结构动力相互作用对基础隔震结构的影响^[3-4]; Constantinou 等人对单自由度上部结构的基础隔震问题给出了考虑 SS I效应的分析,并以体系基频的变化程度作为辨别 SS I效应对隔震体系

基金项目:国家自然科学基金(50808100)资助项目。

收稿日期:2011-04-12;修订日期:2011-07-01

通讯作者:于旭,男,博士,讲师,1977年3月生,E-mail:yuxurichard@sina.com。

的影响标识^[5]。王彬等人运用ANSYS软件的二次开发功能,提出将结构、隔震层和地基结合起来作为一个完整系统分析^[6],并对一叠层橡胶基础隔震框架结构进行了整体地震响应有限元分析。上述研究表明,考虑和不考虑SSI效应时隔震体系的动力特性和地震响应存在明显差异,上述理论研究成果的正确性有待进一步验证。

本文利用土性地基和刚性地基上隔震结构体系大型振动台模型试验所取得的资料,通过分析有无SSI效应时隔震结构体系的地震反应规律,探讨SSI效应对隔震结构体系的影响规律。

1 振动台模型试验概况

刚性地基上隔震结构体系(不考虑SSI效应)振动台模型试验与土性地基上隔震结构体系(考虑SSI效应)振动台模型试验应遵循相同的模型相似关系,在试验模型设计中考虑了模型与原型的相似性,选取位移 x 、应力 σ 和弹性模量 E 为基本相似系数,根据Bukingham定理导出各物理量的相似关系式,详见文献^[7]。试验模型的缩尺比例为1/20。试验中通过考虑两项措施来减小边界效应的影响:(1)控制模型结构的平面尺寸,使之与地基模型的平面尺寸相比尽量小于一定的倍数,(2)本试验所

用的模型箱为南京工业大学岩土工程研究所研制的层状剪切变形土箱,该模型土箱的各层框架间可以自由地产生水平相对变形,对土的剪切变形几乎没有约束,大大减小了边界对波的反射。刚性地基与土性地基上隔震结构模型的尺寸相同,隔震支座采用直径为100 mm的铅芯橡胶支座^[8],根据试验的相似关系,兼顾施工方便,模型土采用含水量较大的均匀粉细砂(含水量实测值20.4%~21.2%),土性地基条件下模型基础采用桩基础,模型体系布置如图1所示。

试验中,采用压电式加速度计、拉线式位移传感器、应变传感器和三向力传感器测量上部结构、隔震层、基础和地基土体的动力响应,各测点布置见图1,图1中 $V_1 \sim V_4$ 为竖向加速度计, $A_1 \sim A_{12}$ 为水平向加速度计,试验中刚性地基与土性地基上隔震结构模型体系采用相同的测点布置,以对比两种结构模型体系的试验结果。试验选择了3个有代表性的地震动作为输入地震动,分别为EL-Centro波、Kobe波及南京人工波,试验工况详见文献^[7],模型结构的振动方向为水平单向,输入加速度峰值按小量级分级递增输入,依照相似关系调整加速度峰值和时间间隔^[9]。

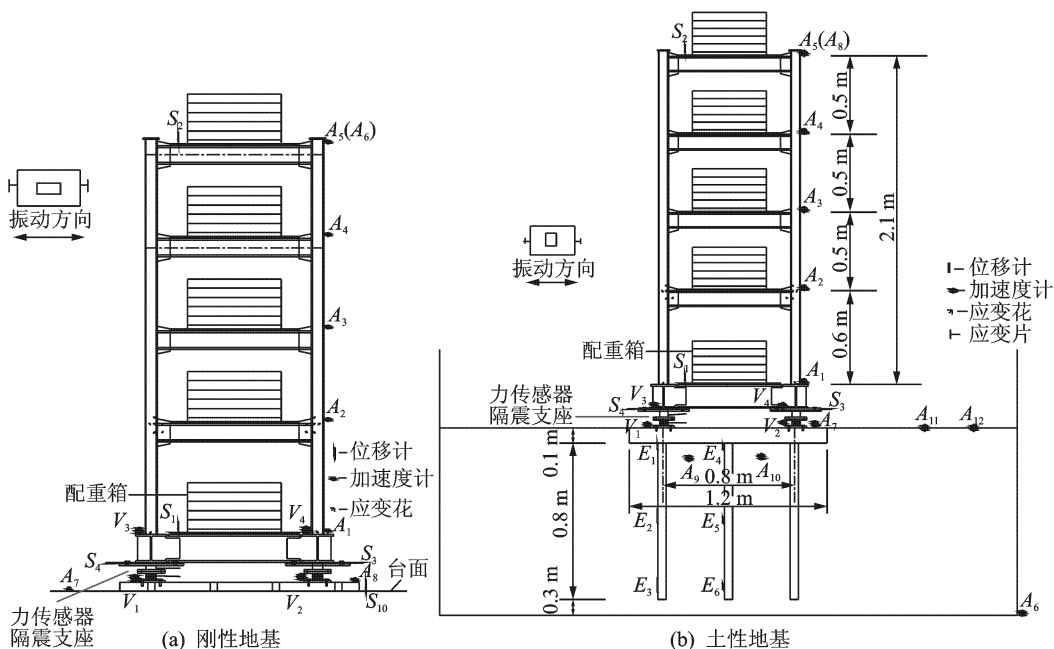


图1 模型体系布置及测点布置图

2 SSI效应对隔震结构体系基底地震动的影响

由于地基与基础的动力相互作用及上部结构的振动反馈,基础处的地震动与自由场地震动不完

全相同^[10]。为研究SSI效应对隔震结构体系基底地震动的影响,试验中,沿模型激振方向在基础顶面和土层表面分别布置了加速度计 A_7 和 A_{11} ,通过比较 A_7 和 A_{11} 测点的加速度反应,探讨SSI效应对隔震结构基底地震动的影响规律,加速度计 A_7 、 A_{11} 的

布置如图1所示。图2为典型的基础顶面测点 A_7 与土表测点 A_{11} 的加速度时程及傅氏谱比较,图中STEL2为试验工况编号。

由图2可以看出,由于SSI效应的影响,基础顶面测点 A_7 的加速度峰值小于土表测点 A_{11} 的加速度峰值。比较基础顶面测点 A_7 与土表测点 A_{11} 的傅氏谱,两者的频谱组成不完全相同,相对于土表测点 A_{11} 的频谱组成,基顶测点 A_7 的频谱组成在17~

22 Hz范围内的谱值明显增大,而这一频段正是土性地基条件下基础转动角加速度分量的主频范围^[7],而刚性地基上基础顶面测点与台面测点的加速度峰值差别很小,其频谱组成基本相同。以上分析表明,由于SSI效应的影响,隔震结构基底地震动的峰值小于自由场地震动的峰值,其频谱组成与自由场地震动也不完全相同,与基础转动分量主频范围相近的频段获得加强。

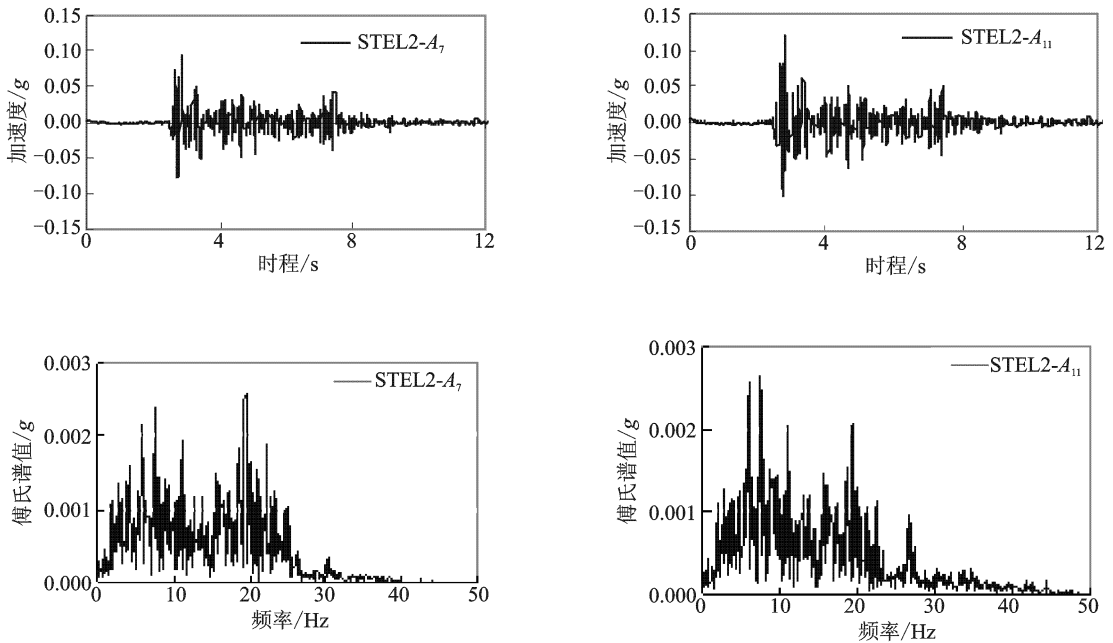


图2 典型的基础顶面测点 A_7 与土表测点 A_{11} 的加速度时程及傅氏谱比较

3 SSI效应对隔震结构体系楼层加速度反应的影响

3.1 楼层加速度放大倍数

“楼层加速度放大倍数”是指:和隔震结构基底输入加速度峰值相比,上部结构楼层加速度反应峰值放大或缩小程度的一个系数。由于土与结构动力相互作用的影响,隔震结构体系在刚性地基与土性地基上楼层加速度放大倍数并不相同。图3为两种不同地基条件下,输入EL-Centro波时隔震结构体系的楼层加速度放大倍数的对比,图中层号0代表模型基底。

由图3可以看出,由于SSI效应的影响,土性地基与刚性地基上隔震结构体系的楼层加速度放大倍数差异较大,而不同峰值加速度输入时,SSI效应对隔震结构体系楼层加速度放大倍数的影响也不相同,综合来看,SSI效应对隔震结构体系楼层加速度放大倍数的影响具有以下规律:

(1) 土性地基上隔震结构体系楼层加速度放大倍数较刚性地基时增大,即土性地基上SSI效应

使隔震效果降低。

(2) SSI效应对隔震结构体系楼层加速度放大倍数的影响与基底加速度峰值有关,基底加速度峰值越大,土性地基上隔震结构体系楼层加速度放大倍数较刚性地基时增大越显著,即基底加速度峰值越大,SSI效应使隔震效果降低越明显。

(3) 由于SSI效应的影响,土性地基与刚性地基上隔震结构楼层加速度放大倍数的分布规律也不相同。不同峰值的基底地震动输入下,刚性地基上隔震结构的楼层加速度放大倍数的分布均呈现底层和顶层较大,而中间层相对较小的分布规律,呈现整体平动的特点。而土性地基条件下,在基底加速度峰值较小时,隔震结构楼层加速度放大倍数的分布以底层和顶层较大,中间层相对较小,呈现整体平动的特点。但随着基底加速度峰值的增加,隔震结构楼层加速度放大倍数的分布随着楼层的高度增加而增大,结构底层加速度放大倍数小于顶层的加速度放大倍数,呈现放大晃动的特点。

3.2 隔震结构体系楼层加速度反应组成分析

由于SSI效应的影响,隔震结构体系楼层加速

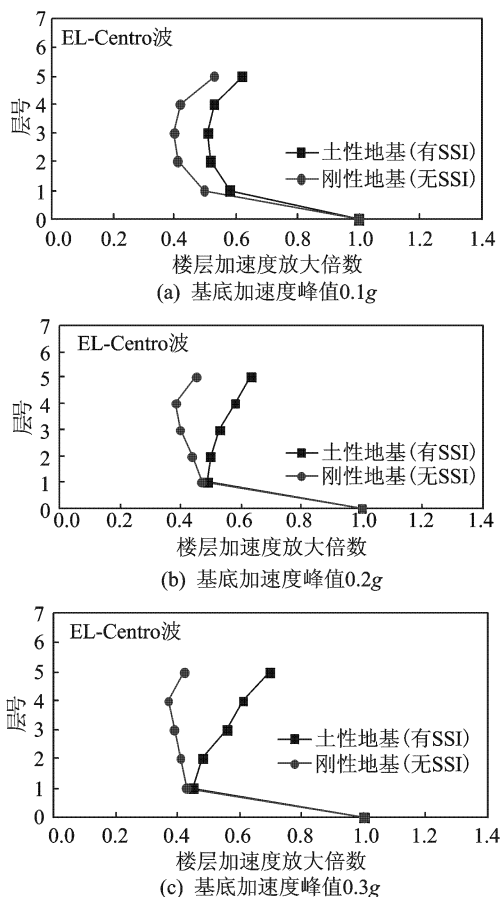


图3 不同地基条件下隔震结构体系楼层加速度放大倍数对比(输入EL-Centro波)

度反应较刚性地基时有很大不同,文献[11]指出由于SSI效应的影响,结构楼层加速度由基础平动、基础转动引起的摆动和结构变形三部分组成。对于本文研究的隔震结构体系,楼层位移反应包括基础平动、隔震层转动变形和结构弹塑性变形三部分,则楼层加速度反应 A_u 可分解为基础平动的加速度反应 A_c ,隔震层转动引起的摆动加速度反应 $H\ddot{\theta}_2$ 和隔震结构弹塑性变形引起的加速度反应 A_g 三部分组成(如图4),则楼层加速度反应 A_u 的组成由式(3)计算

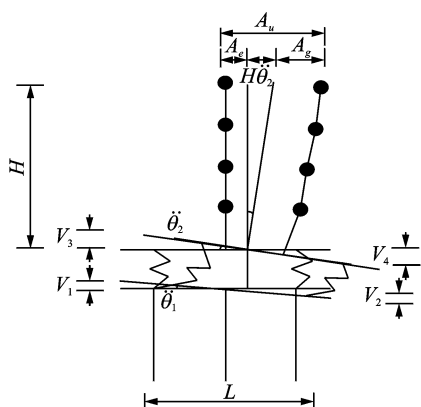


图4 楼层加速度组成分析

$$A_u = A_c + H\ddot{\theta}_2 + A_g \quad (1)$$

式中: H 为模型体系楼层高度; A_c 为基础平动的加速度反应由基础顶面测点 A_7 和土表测点 A_{11} 计算得到,即

$$A_c = A_{11} - A_7 \quad (2)$$

式(3)中: $\ddot{\theta}_2$ 为隔震层的转动角加速度,由隔震层面测点 V_3 和测点 V_4 计算得到^[8]

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{V_3 + V_4}{L} \quad (3)$$

式中: L 为测点 V_3 和 V_4 的距离。

A_u 隔震结构楼层加速度反应由楼层布置的测点 $A_2 \sim A_5$ 测得。

A_g 为隔震结构弹塑性变形引起的加速度反应由式(3)计算得到。

图5给出了在工况STEL1下,土性地上隔震结构顶层加速度反应的各组成分量时程及傅氏谱,图中自上而下分别为隔震结构楼层加速度反应 A_u ,隔震结构弹塑性变形引起的加速度反应 A_g ,隔震层转动引起的摆动加速度反应 $H\ddot{\theta}_2$,基础的平动加速度反应 A_c ;图6给出了在工况EL1下,刚性地基上隔震结构顶层加速度反应的各组成分量时程及傅氏谱,图中自上而下分别为隔震结构楼层加速度反应 A_u ,隔震结构弹塑性变形引起的加速度反应 A_g ,隔震层转动引起的摆动加速度反应 $H\ddot{\theta}_2$ 。对比图5,6可以看出,由于SSI效应的影响,土性地基和刚性地基上隔震结构顶层加速度反应的各组成分量差异较大,综合来看,具有以下规律。

(1) 土性地基上,隔震结构顶层加速度反应的各组成分量主要以隔震结构弹塑性变形分量为主,隔震层转动引起的摆动分量 $H\ddot{\theta}_2$ 次之,基础的平动分量 A_c 较小;而刚性地基上,隔震结构顶层加速度反应的各组成分量主要以隔震结构弹塑性变形分量 A_g 为主,隔震层转动引起的摆动分量 $H\ddot{\theta}_2$ 很小,无基础的平动分量。

(2) 对比图5,6的傅氏谱可以看出,土性地基上隔震结构顶层加速度反应 A_u 的傅氏谱与刚性地基上隔震结构顶层加速度反应 A_u 的傅氏谱相似,仅在频段为15.7~17.4 Hz范围内差异较大,而此频段正是土性地基上隔震层转动引起的摆动分量 $H\ddot{\theta}_2$ 的主频范围,即土性地基上,SSI效应的影响使隔震结构楼层加速度反应的频谱组成在摆动分量 $H\ddot{\theta}_2$ 的主频段明显增强。

(3) 进一步对比图5,6可以看出,土性地基上

隔震结构弹塑性变形分量 A_g 的频谱组成与刚性地基上隔震结构楼层加速度反应 A_u 的频谱组成基本相同,即土性地基上隔震结构弹塑性变形分量 A_g 其实质相当于刚性地基上隔震结构的楼层加速度反应。

(4) 从图5时程图可以看出,土性地基上, $H\ddot{\theta}_2$ 加速度反应较大, A_e 加速度反应较小,而 $H\ddot{\theta}_2$ 与隔

震结构弹塑性变形分量 A_g 不同步,可能同相也可能反相,但叠加后形成的顶层加速度反应 A_u 较弹塑性变形分量 A_g 明显增大,而隔震结构弹塑性变形分量 A_g 其实质相当于刚性地基上隔震结构的楼层加速度反应。因此,土性地基上,隔震层转动引起的摆动分量 $H\ddot{\theta}_2$ 是导致隔震结构楼层加速度反应增大的主要因素之一。

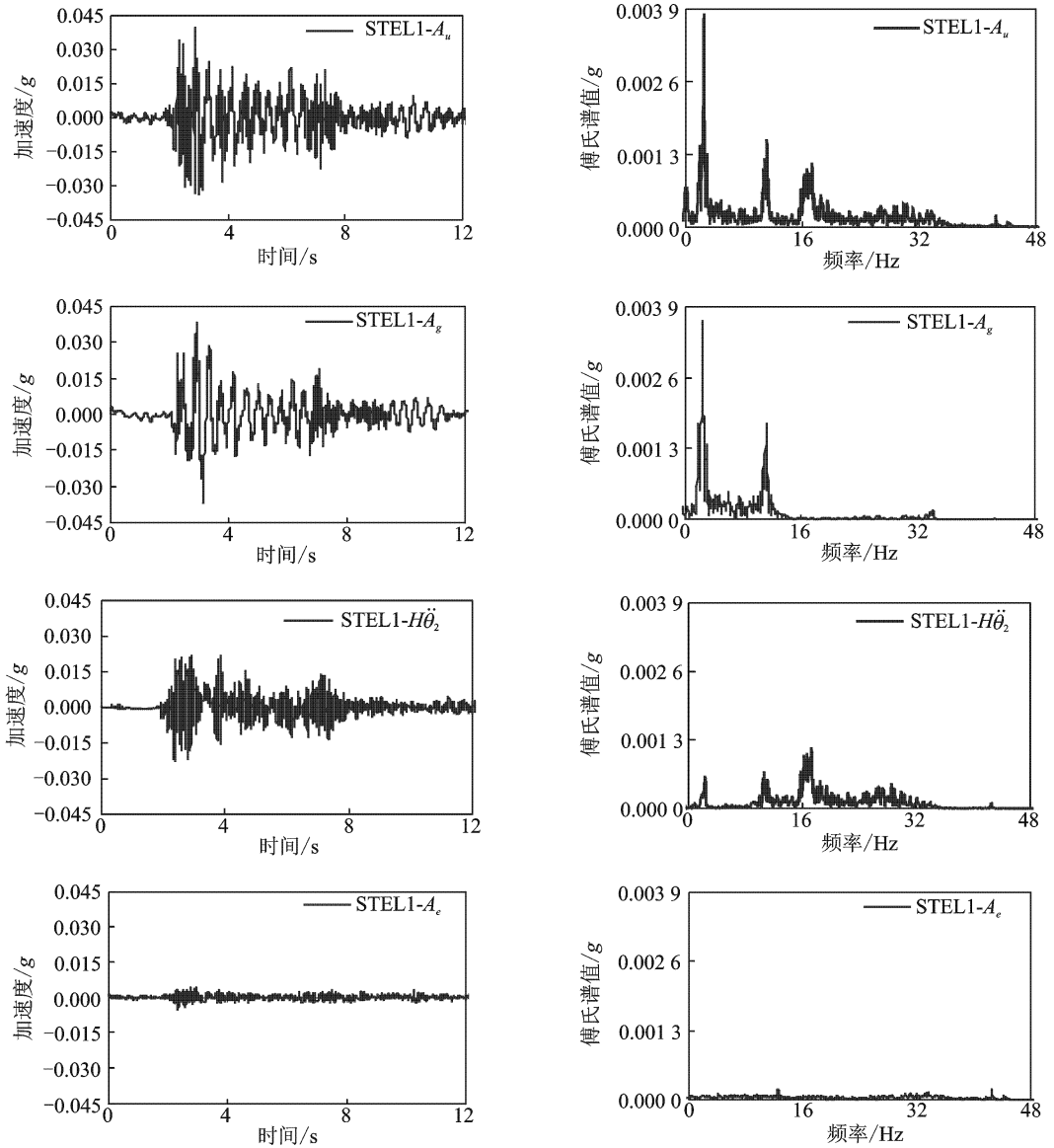


图5 土性地基上隔震结构顶层加速度反应的各组分量时程及傅氏谱(工况 STEL1)

4 结 论

本文对刚性地基和土性地基上隔震结构体系大型振动台模型试验的试验结果进行了进一步的整理,试验中采用含水量较大的均匀粉细砂作为模型地基土,通过分析有无 SSI 效应时隔震结构体系的地震反应规律,研究 SSI 效应对隔震结构体系动

力特性、基底地震动、楼层加速度反应的影响,本文得到的主要结论有:(1) 由于 SSI 效应的影响,隔震结构基底地震动的峰值小于自由场地震动的峰值,隔震结构基底地震动的频谱组成与自由场地震动不完全相同,基底地震动的频谱组成中与基础转动分量主频范围相近的频段获得加强。(2) 由于 SSI 效应的影响,土性地基上隔震结构楼层加速度放大

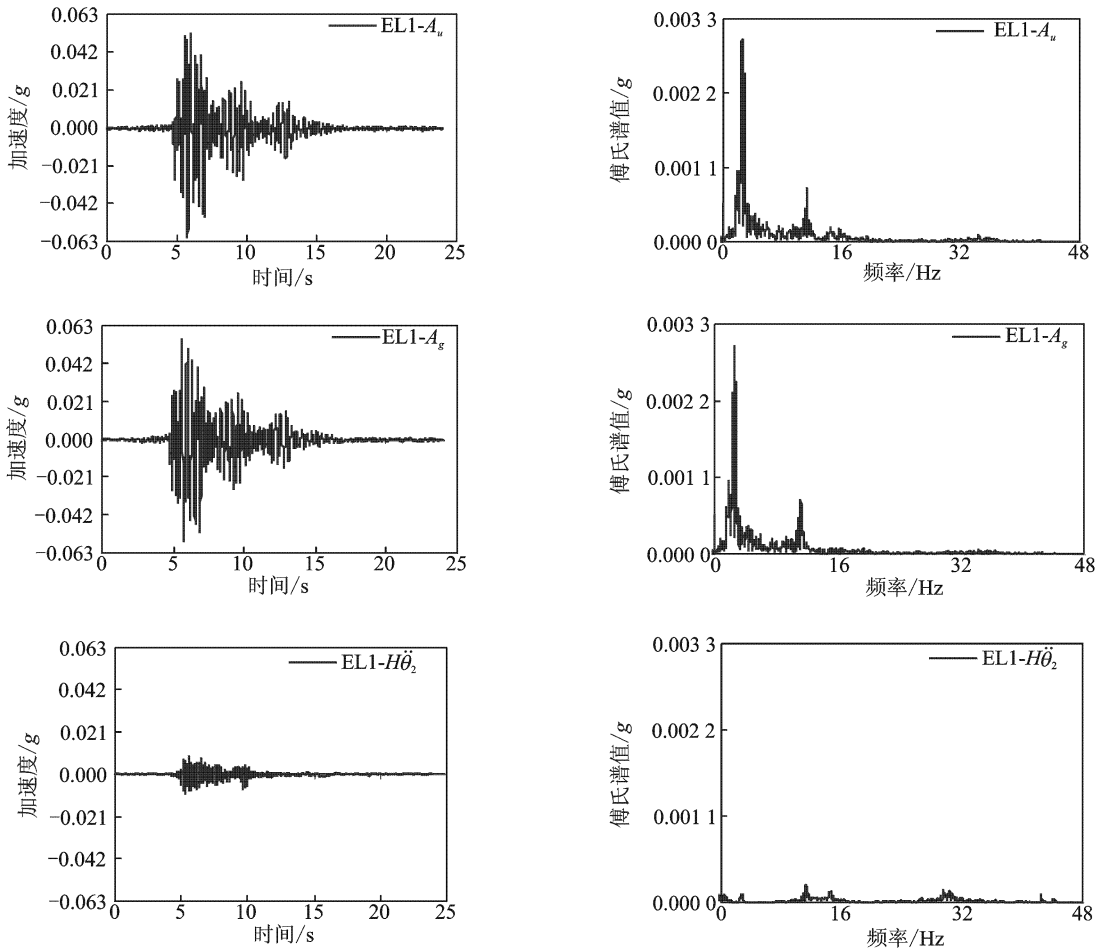


图6 刚性地基上隔震结构顶层加速度反应的各项组成分量时程及傅氏谱(工况EL1)

倍数较刚性地基时增大,即土性地基上 SSI 效应使隔震效果降低; SSI 效应对隔震结构楼层加速度放大倍数的影响与基底加速度峰值有关。(3) 由于 SSI 效应的影响,土性地基与刚性地基上隔震结构楼层加速度反应的组成分量并不相同,且隔震层转动引起的摆动分量显著增大,隔震层转动引起的摆动分量是导致土性地基上隔震结构楼层加速度反应增大的主要因素之一。

参考文献:

- [1] Bashshi A, Shimazu T, Araki H. A practical proposal for seismic isolation design against extremely strong earthquakes [C]//Proc 12WCEE. Auckland: [s. n.], 2000:1336.
- [2] 日本建筑学会. 隔震结构设计[M]. 刘文光,译. 北京:地震出版社,2006.
- [3] 李延涛. 考虑土-结构动力相互作用的基础隔震与结构控制理论研究[D]. 天津:天津大学建筑工程学院, 2004.
- [4] 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.

- [5] Constantinou M C, Kneifati M. Dynamics of soil-base-isolated-structure systems [J]. J Struc Engrg, ASCE,1988,114(1):211-221.
- [6] 王彬,丁海平. 地基-基础隔震系统整体地震响应有限元分析[J]. 中国安全科学学报, 2005,15(8):12-16.
- [7] 于旭,宰金珉,王志华,考虑 SSI 效应的铅芯橡胶支座隔震结构体系振动台模型试验研究[J]. 南京航空航天大学学报,2010,42(6):786-792.
- [8] 于旭,宰金珉,王志华,铅芯橡胶支座隔震钢框架结构体系振动台模型试验研究[J]. 世界地震工程,2010,26(3):30-36.
- [9] 于旭. 考虑土与结构相互作用的隔震结构体系性能研究[D]. 南京:南京工业大学土木工程学院,2009.
- [10] Celebi M. Seismic response of two adjacent buildings, I: data and analysis [J]. Journal of Structure Engineering ASCE, 1993,119(8):2461-2476.
- [11] 陈跃庆,不同土性的 SSI 体系振动台试验研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2003.