

DOI: 10.11779/CJGE201512007

土-桩-隔震结构动力相互作用体系振动反应特性 试验研究

朱 超¹, 庄海洋^{*1}, 于 旭^{1,2}, 刘 帅¹

(1. 南京工业大学交通学院, 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: 软夹层地基条件必将会对隔震结构的隔震效率及其动力反应特性产生一定的影响。鉴于此, 基于软夹层地基上基础隔震结构地震反应的振动台模型试验结果, 对比分析了不同频谱特性和不同强度地震动作用下软夹层地基、基础隔震层和隔震结构的振动加速度反应特征, 初步给出了软夹层地基上土-桩-隔震结构动力相互作用体系的振动反应特性及其规律。结果表明, 试验设置的模型地基基本上能够反映软夹层地基的地震反应特性。同时, 输入地震动频谱特性及其强度对软夹层地基上基础隔震层的隔震效率及其隔震结构的动力反应规律都具有明显的影响, 造成上述影响的主要原因应为软夹层地基明显改变了输入地震动的频谱特性和强度, 起到了天然隔震的作用, 其具体影响规律和影响程度还需做进一步的深入研究。

关键词: 软夹层地基; 基础隔震结构; 振动台试验; 地震反应

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)12-2182-07

作者简介: 朱 超(1989-), 男, 江苏镇江人, 硕士研究生, 主要从事土与结构动力相互作用理论与应用研究。E-mail: zhuchao_nj@gclnewenergy.com。

Experimental study on vibration characteristics of soil-pile-isolated structure dynamic interaction system

ZHU Chao¹, ZHUANG Hai-yang¹, YU Xu^{1,2}, LIU Shuai¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Department of Civil Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Isolation efficiency and dynamic response of base-isolated structure are certainly influenced by the soft interlayer foundation conditions. Based on the model shaking table tests, the earthquake response characteristics of the soft interlayer foundation, base-isolation system and isolation structure under different spectral characteristics and intensities of input ground motion are analyzed and compared. The earthquake response characteristics and rules for the soil-isolated structure dynamic interaction system are obtained. The results show that the model foundation can reflect the earthquake response characteristics of soft interlayer foundation. At the same time, the spectral characteristics and intensities of input motion have significant impacts on the efficiency of isolation layer and the change law along the vibration response of base-isolated structure. The main reason is that the characteristics of the input motion are changed obviously by the soft foundation, which plays the role of a natural isolation layer for the upper structure.

Key words: soft interlayer foundation; base-isolated structure; shaking table test; earthquake response

0 引言

随着城市化进程的不断推进, 城区土地资源变得愈发珍贵, 一些建筑难以避免要建造在不良地基上。由于中国属于地震多发国家, 隔震结构作为一种经济、安全、有效的抗震结构形式正越来越多地应用于不同结构形式和场地条件的建筑中。从前人的研究看, 建于软弱场地上的隔震结构虽由于软土地基基本周期较长, 但隔震结构仍能进一步延长体系的自振周期以达

到隔震的目的^[1]。软夹层地基是一种软弱土层与硬土层交错分布的分层地基形式, 地震波通过地基时其频谱特性的变化规律明显异于其他类型场地, 且软夹层地基上部隔震结构的振动特性也会随之改变。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51278246); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK2012477)

收稿日期: 2014-11-09

*通讯作者

在考虑 SSI 效应对隔震结构动力特性的影响研究方面, 有学者分别从理论和试验出发, 着重研究了隔震高层建筑的隔震性能^[1]及其损伤影响^[2], 认为 SSI 效应对隔震结构影响较小; 尚守平等^[3]和刘方成^[4]对土-结构非线性及 SSI 效应下的隔震结构的振动特性及自振周期变化进行了研究; 朱宏平等^[5]对隔震结构的研究现状及进展做了系统的介绍; Tsai 等^[6]通过对土-FPS 隔震结构进行有限元分析, 认为考虑 SSI 效应后隔震结构的地震反应明显增大; Spyros 等^[7]将上部隔震结构进行等效, 研究了 SSI 效应对隔震结构体系动力特性, 得出 SSI 效应对隔震结构体系阻尼的影响很小; 庄海洋等^[8]分别对刚性地基和一般地基上隔震结构的地震反应进行了系列模型试验, 对比分析了模型地基对隔震层的隔震效率和隔震结构动力反应规律。然而, 现有的研究成果多集中于对一般地基或刚性地基上隔震结构动力反应的研究, 而软夹层地基上土-桩-隔震结构动力相互作用研究却少之又少。

综上所述, 本文基于软夹层地基上大型振动台试验, 对试验结果进行了整理, 初步分析了软夹层地基上桩基基础隔震结构的振动特性、隔震装置的隔震效果以及隔震体系的动力特性等。本文的试验结果和研究发现能为进行软弱地基上隔震结构动力反应特性的研究提供有价值的知识, 为下一步进行数值分析和简化算法的研究提供试验依据与验证。

1 试验概况

为了尽可能模拟出土-结构的动力相互作用特性, 土与结构、上部结构与地基尽可能满足相同的相似关系。根据 Buckingham π 定理^[9], 选取长度、加速度和隔震支座压缩应力为基本相似参数, 确定试验体系相似比见表 1。

试验采用单向激振, 选用地震波为 El-Centro 波、Kobe 波、南京人工波。El-Centro 波为 1940 年美国 Imperial 山谷地震时记录的强震地震波, 该地震波原始峰值加速度为 $0.349g$, 强震部分持续时间约为 26 s, 该地震波的加速度时程及其对应的傅氏谱如图 1, 2 所示。Kobe 波为 1995 年日本阪神地震中神户海洋气

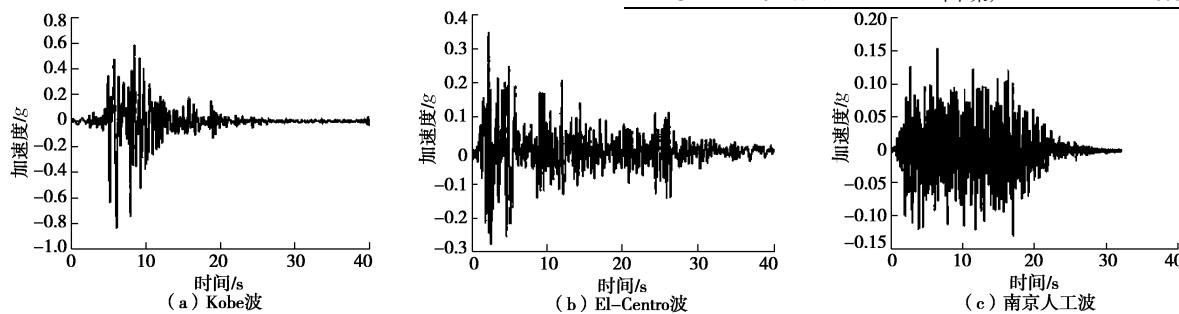


图 1 试验中输入地震波对应的加速度时程

Fig. 1 Original time-histories of acceleration used as input motion in tests

象台记录的强震加速度记录, 本试验中取其南北向的水平向加速度记录作为振动台的输入波, 该地震波的原始峰值加速度为 $0.85g$, 强震部分持续时间约为 10 s, 南京人工波是由江苏省地震工程研究院采用人工合成的人工地震波, 3 种波的傅氏谱见图 2, 其中 Kobe 波傅氏谱频宽最小, 南京人工波傅氏谱频宽最宽, 而 El-Centro 波的频宽居中。试验中输入地震动的时间步长根据模型时间相似比 $1:4.47$ 进行了调整, 调整后的时间步长为 0.0045 s (原时间步长为 0.02 s), 输入地震波对应的加速度时程及其对应的反应谱分别如图 1, 2 所示, 软夹层地基模型试验加载方案如表 2 所示。

表 1 模型与原形之间的相似比

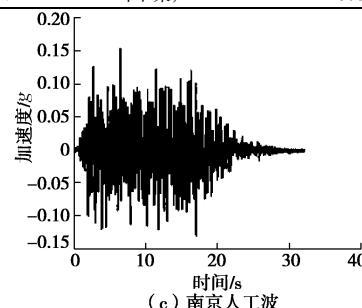
Table 1 Similitude ratios between model and prototype

物理量	相似关系	相似比	
		欠人工质量	人工质量
长度	S_l	1/20	1/20
位移	$S_x = S_l$	1/20	1/20
弹性模量	S_E	1	1
上部结构密度	$S_\rho = S_E / S_l$	15	20
上部结构质量	$S_m = S_\rho S_l^3$	1/533	1/400
支座压缩应力	S_σ	1	1
土体剪切模量	S_G	1/4	1/4
时间	$S_t = (S_m / S_k)^{1/2}$	1/5.16	1/4.47
频率	$S_f = 1 / S_t$	5.16	4.47
加速度	$S_a = S_l / S_t^2$	1.33	1

表 2 试验加载工况

Table 2 Loading schedules of tests

工况	工况编号	地震波类型	加速度峰值/g
1	JTWN1	白噪声	0.05
2	JTEL1	El-Centro 波	0.05
3	JTNJ1	南京人工波	0.05
4	JTKB1	Kobe 波	0.05
5	JTEL2	El-Centro 波	0.15
6	JTNJ2	南京人工波	0.15
7	JTKB2	Kobe 波	0.15
8	JTEL3	El-Centro 波	0.30
9	JTNJ3	南京人工波	0.30
10	JTKB3	Kobe 波	0.30
11	JTEL4	El-Centro 波	0.50
12	JTKB4	Kobe 波	0.50
13	JTWN2	白噪声	0.05



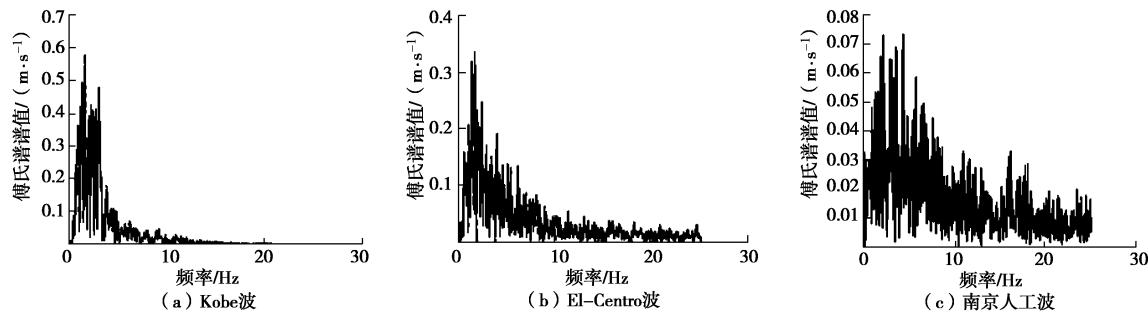


图 2 试验中输入地震波对应的傅氏谱谱值

Fig. 2 Fourier spectra of acceleration used as input motion in tests

振动台模型试验中上部结构采用四层钢框架结构, 上部结构底层层高 0.6 m, 其余层为 0.5 m, 激振方向模型高宽比为 2.625, 每层配重质量为 736 kg, 总配重质量为 3680 kg, 隔震支座采用 4 个直径为 100 mm 的铅芯橡胶支座, 铅芯直径 8 mm, 橡胶总计 22 层。隔震支座平均水平刚度 0.278 kN/mm, 竖向刚度 197.9 kN/mm, 模型基础采用 2×3 群桩基础。试验模型布置如图 3 所示。软夹层地基模型试验地基土为分层土, 基于实验布置图, 0~0.6 m 为密砂层, 0.6~1.0 m 为软夹层, 1.0~1.3 m 为松砂层。从上至下分别为 0.3 m 松散砂土、0.4 m 高含水率黏土、0.6 m 饱和密实砂土, 分层土形成“软夹层地基”。

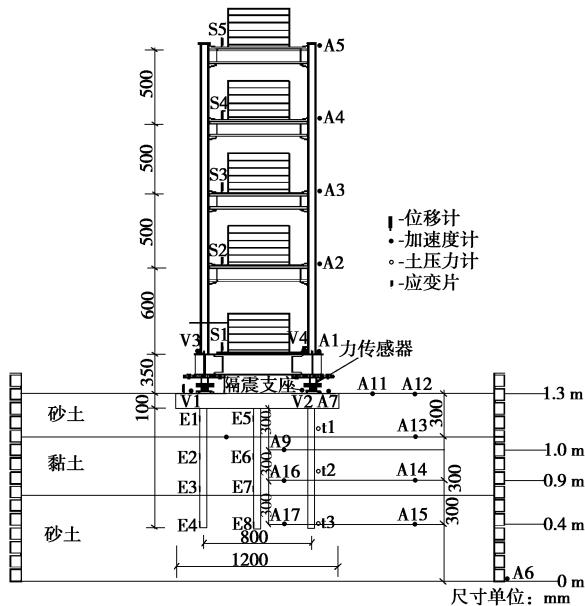


图 3 试验装置布置图

Fig. 3 Layout of experimental facilities

模型土箱采用南京工业大学岩土工程研究所研制的层状剪切变形土箱^[10], 该模型箱的净尺寸为 3.5 m (振动方向)×2 m (横向)×1.7 m (高度), 模型箱由 15 层矩形平面钢框架由下而上叠合, 每层钢框架间放置凹槽, 凹槽内放钢滚珠, 形成可以自由滑动的支撑点, 每层钢框架由 4 根方钢管焊接而成。为限制模型土箱在垂

直振动方向的变形, 在与振动方向垂直的侧面各贴了一块钢板, 钢板与框架采用螺栓连接, 模型箱的两侧各设有两根立柱, 以限制模型箱的平面扭转变形, 模型箱的内侧贴有一层橡胶膜, 可以防止土或水漏出。由于该模型土箱的各层框架间可以自由的产生水平相对变形, 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, 故能较好地模拟土的边界条件。现场试验如图 4 所示。

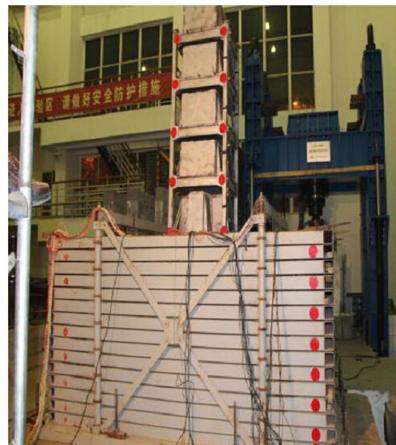


图 4 试验现场照片

Fig. 4 Photo of experimental site

2 试验结果分析

2.1 软夹层地基振动特性分析

在振动台模型试验中, 模型地基的地震反应规律能否与实际原型地基的反应相对应, 是决定土与结构动力相互作用的一个重要因素。因此, 图 5 首先给出了输入不同地震波时模型地基不同深度处加速度反应峰值随深度的变化曲线。总体来看, 南京人工波对输入峰值加速度的放大效应最为明显, El-Centro 波次之, Kobe 波的放大效应最弱。这一规律也充分说明, 地震波的频谱特性对模型地基的动力反应程度有着重要的影响, 即在相同峰值加速度条件下, 具有明显近断层脉冲地震动特性的 Kobe 波造成了模型地基土发生了最强的强度弱化, 使得输入加速度峰值沿地基向

上传播时放大效应最弱, EI-Centro 波峰值加速度被放大效应稍强, 南京人工波峰值加速度被放大效应最强。图 6 给出了同一输入地震波条件下不同输入峰值加速度时加速度反应峰值随深度的变化曲线。总体来看, 随着输入加速度峰值的变大, 模型地基土层对加速度峰值的放大效应越来越小, 尤其是底部土层的影响尤为明显。

从图 5, 6 都可以看出, 从台面输入加速度的峰值经底部土层放大后, 软夹层下部的土体对传来的地震波峰值加速度产生了明显的削弱作用。但是, 经过软夹层上部土层后加速度反应峰值又继续被放大。这一变化规律与已有场地地震效应的反应规律研究结果基本一致, 基本说明了本试验设计的模型地基能够基本反映软夹层地基的地震反应规律。

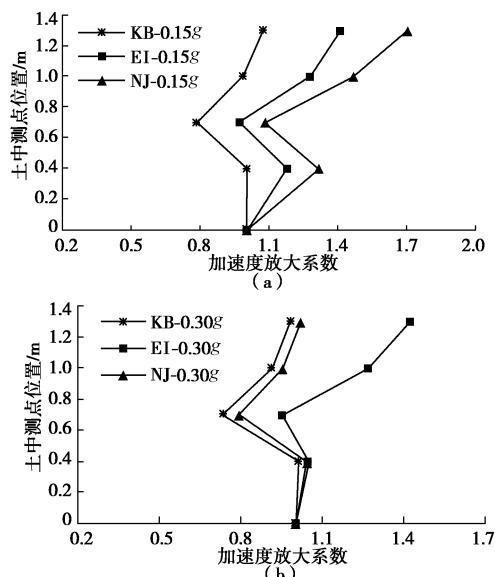


图 5 土层不同深度放大系数曲线

Fig. 5 Amplification coefficient curve at different depth of soil foundation

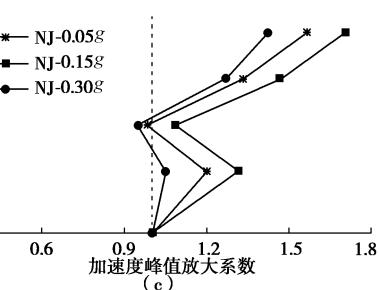
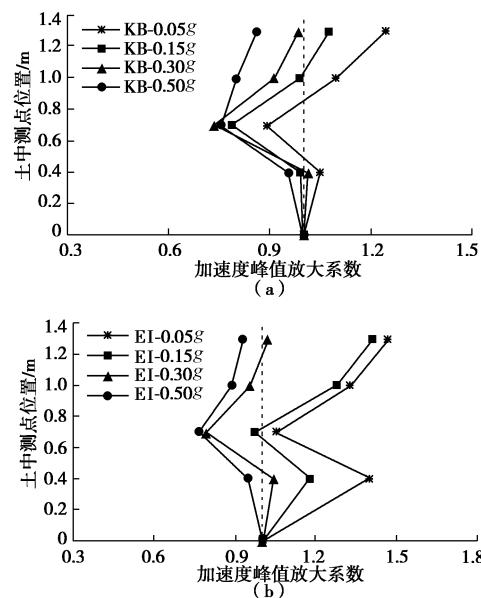


图 6 加速度放大系数曲线

Fig. 6 Curves of amplification coefficient at different depths of soil foundation

已有的大量研究表明^[11-12], 软夹层对输入加速度的频谱特性具有明显的改变作用。根据模型地基不同深度处加速度计的测量结果, 图 7 给出了不同输入地震波对应的模型地基不同深度处加速度反应动力系数谱。由图 7 可知, 随着距离模型地基底部的深度变浅, 在周期较短范围内 (0~0.15 s) 动力系数放大效应明显, 而在周期范围内 (0.2~1.0 s) 动力系数有减小趋势。这一动力系数谱的变化规律明显与软弱自由场地的地震反应谱变化规律相反。究其原因, 主要可能为场地中群桩基础的存在可能对周围场地起到了明显的地基加固作用, 使得本试验中含软夹层场地的加速度

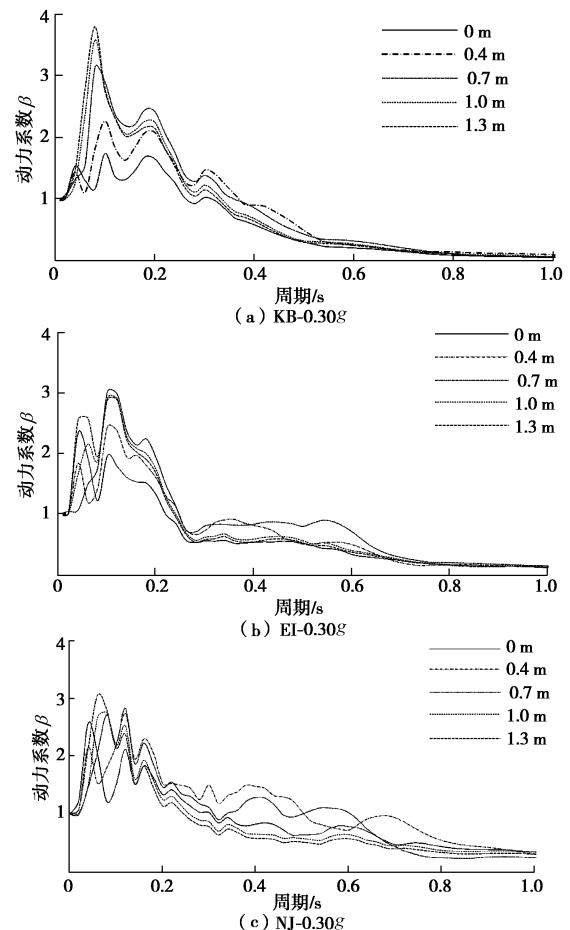


图 7 土层不同深度动力系数 β 谱比较

Fig. 7 Comparison of dynamic coefficient spectra at different depths of soil foundation

反应谱变化规律明显区别于自由场对应的规律。这一现象需要在后面数值分析中进一步深入地验证和研究。

2.2 含隔震层振动特性分析

隔震层的振动特性将直接影响其对上部结构的隔震效果, 本节基于模型试验结果对隔震层的振动反应特性进行分析。表 3 给出了隔震层顶底板处加速度反应峰值对比结果, 由试验结果可知, 输入 Kobe 波和南京人工波时, 随着输入加速度峰值的不断增大, 隔震层顶底板处加速度反应峰值的变化比率(即加速度差值除以底板出峰值加速度)越来越小, 即表明隔震层的隔震效率也越来越低。然而, 当输入 El-Centro 波时, 隔震层的隔震效率随输入峰值加速度改变的变化幅度很小, 只有当输入峰值加速度从 0.30g 增大到 0.50g 时隔震效率明显降低。

总体来看, 基岩输入南京人工波和 Kobe 波时隔震层的隔震效率比输入 El-Centro 波时要好。究其原因, 从图 6(a) 中可以发现, 基岩输入 El-Centro 波时模型地基本身的隔震效果较基岩输入另外两种波时

都要好, 可能由此导致的隔震层的隔震效率明显较差。这一影响也再次说明隔震结构地基对隔震层隔震效率的影响尤为明显。

为了进一步说明隔震层对底部输入地震动的作用, 图 8 给出了输入加速度峰值为 0.30g 时隔震支座上、下部加速度时程曲线对比及动力系数谱。由图可知, 隔震支座对底部输入地震动的动力系数谱影响明显, 在短周期段动力系数谱峰值向长周期移动。隔震支座的影响尤其体现在对周期范围为 0.3~1.0 s 范围内动力系数谱值的影响更为明显, 即隔震支座对底部输入地震动在上述周期范围内起到放大谱值的作用, 总体来看, 南京人工波对动力系数谱影响的周期范围及其程度最大, El-Centro 波次之, Kobe 波最小。上述影响在基础隔震结构设计时应充分考虑。

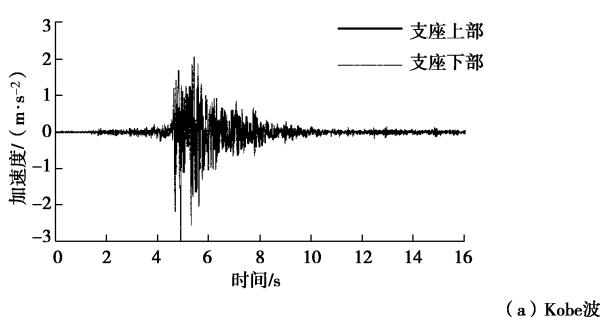
2.3 隔震结构的振动特性分析

本文最后对软夹层地基上隔震结构的振动反应特性进行分析。图 9 给出了隔震结构各层的加速度放大系数, 图中“0”层号代表隔震层底板处, “1”层号代

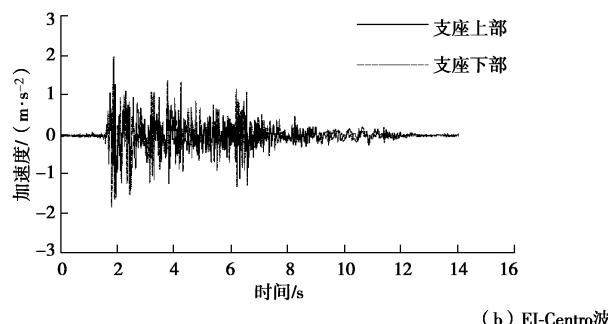
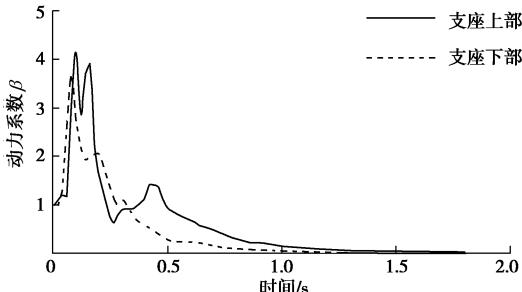
表 3 隔震支座上部、下部加速度峰值差值

Table 3 Differences of acceleration peak between top and bottom of isolation layer

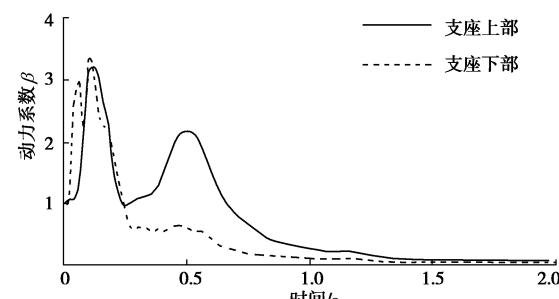
输入加速度峰值/g	测点位置	El-Centro 波 峰值/(m·s ⁻²)	峰值变化比	Kobe 波 峰值/(m·s ⁻²)	峰值变化比	南京人工波峰值/(m·s ⁻²)	峰值变化比
0.05	支座上部	0.355	0.469	0.414	0.646	0.473	0.642
	支座下部	0.669		1.157		0.703	
0.15	支座上部	0.565	0.488	1.101	0.503	0.642	0.507
	支座下部	1.103		2.160		1.301	
0.30	支座上部	1.048	0.475	1.639	0.458	1.401	0.450
	支座下部	1.998		3.026		2.549	
0.50	支座上部	2.492	0.223	2.572	0.328	—	—
	支座下部	3.206		3.827		—	



(a) Kobe 波



(b) El-Centro 波



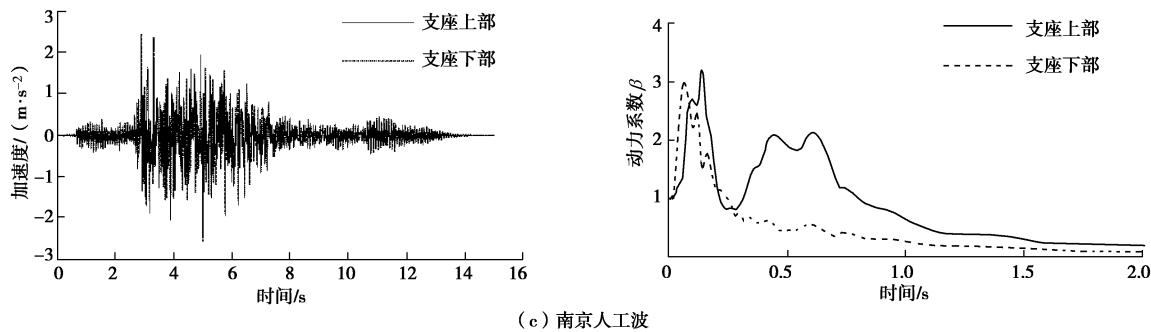
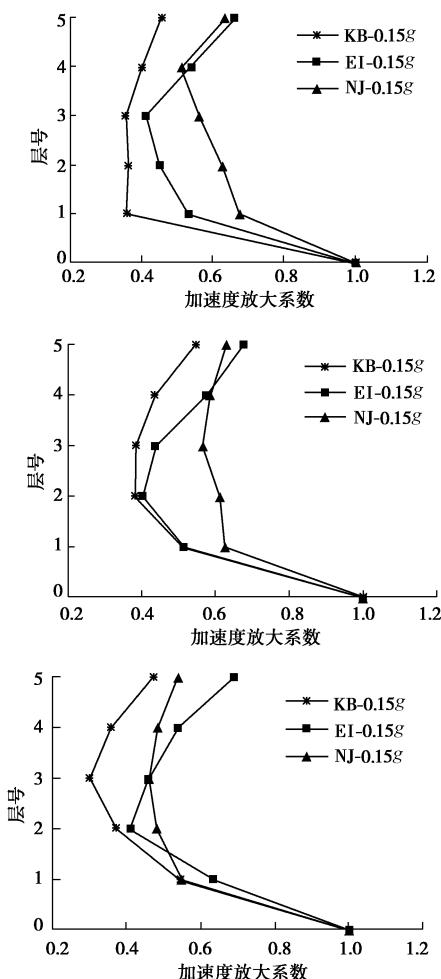
图8 输入峰值 $0.3g$ 时的加速度时程曲线及动力系数 β 谱Fig. 8 Time histories of acceleration and dynamic coefficient response spectra with PGA = $0.3g$ 

图9 上部结构加速度放大系数

Fig. 9 Amplification coefficient of acceleration of base-isolated upper structure

表隔震层顶板处, 其它层号依次类推。由图可知, 当输入地震动峰值加速度较小时, 隔震层顶部的加速度放大系数区别明显, 当峰值为 $0.15g$ 和 $0.30g$ 时, 隔震层上侧放大系数几乎相同。这表明加速度峰值较大时, 隔震层的隔震效率主要由隔震支座的自身特性决定, 受地震波类别等其他外界因素的影响很小。

对试验结果进一步分析, 输入不同的地震动时, 隔震结构各层的隔震效率变化规律也不同, Kobe 波输

入时各层的隔震效率基本一致, El-Centro 波输入时结构 3 层以下隔震效率较好, 而此层之上各层隔震效率变差, 当输入南京人工波时只有顶层的隔震效果变差。当输入地震动峰值加速度增加到 $0.15g$ 时, 无论输入何种地震动, 结构 2 层以上各层的加速度放大系数均呈稳定的增大趋势, 即隔震层对这些楼层的隔震作用随高度增加也越来越差。然而, 当输入地震动峰值加速度继续增大到 $0.30g$ 时, 隔震结构各层的加速度放大系数随高度的变化规律又有变化, 即不同地震波左右下加速度放大系数变化的转折点分别位于不同楼层处。上述规律说明, 在不同输入地震动条件下软夹层地基上隔震结构的振动反应特性变化非常明显, 这一现象或许与软夹层地基在不同地震动强度作用下的强度弱化程度不同有着一定的联系。具体影响有必要通过与刚性地基或一般地基上隔震结构的实验进行对比性分析, 才能确定软夹层地基对上部隔震结构振动反应特性的影响规律及其程度。但总体来看, 不同地震波在顶层附近加速度峰值都有所放大, 这可能是由于隔震结构的“鞭梢效应”所引起的。

4 结 论

本文通过含软夹层模型地基上隔震结构的振动台模型试验, 初步分析了不同频谱特性和不同地震动强度下软夹层地基、隔震层以及隔震结构整个动力相互作用体系的振动反应特性, 针对本文的试验条件, 得到以下 4 点主要结论。

(1) 根据模型试验中软夹层地基的加速度峰值随深度的变化规律, 可以确定本次试验制作的模型地基能够很好地反应软夹层地基的地震反应规律, 达到了本次试验对软夹层地基的模拟要求。

(2) 通过对隔震层顶底部加速度反应的对比分析, 给出了不同输入地震动条件下隔震层对输入地震动的隔震效果及其频谱特性的影响规律, 尤其是隔震支座对底部输入地震动在中长周期范围内起到放大峰值的作用, 这一点在隔震结构设计中应做进一步的系

统研究。

(3) 通过对隔震结构的加速度反应分析, 给出了不同输入地震动条件下软夹层地基上隔震结构的振动反应特性变化规律, 尤其是输入地震动频谱特性和强度对隔震结构加速度反应规律影响较为复杂, 主要原因为软夹层地基在不同地震动强度作用下对输入地震动频谱特性和强度的改变所造成的。

(4) 本文只是初步对软夹层地基上土-隔震结构相互作用系统的振动台试验结果进行直观的分析, 给出的研究结论也是主要针对试验而言的。软夹层地基对隔震结构振动特性的影响规律需要与刚性地基或一般地基上隔震结构的研究结果进行进一步的对比研究。

参考文献:

- [1] 李昌平, 刘伟庆, 王曙光, 等. 软土地基上高层隔震结构模型振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, **34**(7): 72 - 78. (LI Chang-ping, LIU Wei-qing, WANG Shu-guang, et al. Shaking table test on high-rise isolated structure on soft soil foundation[J]. Journal of Building Structures, 2013, **34**(7): 72 - 78. (in Chinese))
- [2] 杜东升, 刘伟庆, 王曙光, 等. SSI 效应对隔震结构的地震响应及损伤影响分析[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(5): 18 - 25. (DU Dong-sheng, LIU Wei-qing, WANG Shu-guang, et al. Effects of soil-structure interaction on seismic response and damage of isolated structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(5): 18 - 25. (in Chinese))
- [3] 尚守平, 鲁华伟, 邹新平, 等. 土—结构动力相互作用结构自振周期的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, **33**(2): 117 - 125. (SHANG Shou-ping, LU Hua-wei, ZOU Xin-ping, et al. The nature periods of steel frame considering soil and structure interaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, **33**(2): 117 - 125. (in Chinese))
- [4] 刘方成. 土—结构动力相互作用非线性分析及基于 SSI 效应的结构隔震研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008. (LIU Fang-cheng. The research on nonlinear soil structure Interaction and structural seismic isolation based on SSI effect[D]. Changsha: Hunan University, 2008. (in Chinese))
- [5] 朱宏平, 周方圆, 袁涌. 建筑隔震结构研究进展与分析[J]. 工程力学, 2014(3): 1 - 10. (ZHU Hong-ping, ZHOU Fang-yuan, YUAN Yong. Development and analysis of the research on base isolated structures[J]. Engineering Mechanics, 2014(3): 1 - 10. (in Chinese))
- [6] TSAI C S, CHEN C S, CHEN B J. Effects of unbounded media on seismic responses of FPS-isolated structures[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2004, **11**(1): 1 - 20.
- [7] SPYRAKOS C C, KOUTROMANOS I A, MANIATAKIS CH A. Seismic response of base-isolated buildings including soil-structure interaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, **29**(4): 658 - 668.
- [8] ZHUANG Hai-yang, YU Xu, ZHU Chao, et al. Shaking table tests for the seismic response of a base-isolated structure with the SSI effect[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, **67**(6): 208 - 218.
- [9] 于旭, 宰金珉, 庄海洋. SSI 效应对隔震结构地震效应的影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, **43**(6): 846 - 851. (YU Xu, ZAI Jin-ming, ZHUANG Hai-yang. Shaking table model test on lead core rubber bearing in isolation structure system considering SSI[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, **42**(6): 786 - 792. (in Chinese))
- [10] 陈国兴, 王志华, 左熹. 振动台试验叠层剪切型土箱的研制[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(1): 89 - 97. (CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua, ZUO xi. Development of laminar shear soil container for shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 89 - 96. (in Chinese))
- [11] 薄景山, 李秀领, 刘德东, 等. 土层结构对反应谱特征周期的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2003, **23**(5): 42 - 45. (BO Jing-shan, LI Xiu-ling, LIU De-dong, et al. Effects of soil layer construction on characteristic periods of response spectra[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, **23**(5): 42 - 45. (in Chinese))
- [12] 薄景山, 李秀领, 刘红帅. 土层结构对地表加速度峰值的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2003, **23**(3): 35 - 40. (BO Jing-shan, LI Xiu-ling, LIU Hong-shuai. Effect of soil layer construction on peak accelerations of ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, **23**(3): 35 - 40. (in Chinese))