

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.04.022

# 软夹层场地隔震结构动力特性试验与数值计算对比分析

于旭<sup>1,2</sup> 朱超<sup>2</sup> 庄海洋<sup>2</sup> 刘帅<sup>2</sup>

(1. 南京工程学院建筑工程学院, 南京, 211167; 2. 南京工业大学岩土工程研究所, 南京, 210009)

**摘要:**基于刚性地基和软夹层地基上基础隔震结构的振动台模型试验体系,建立了刚性地基和软夹层地基土-基础隔震结构动力相互作用的等尺寸三维有限元分析模型,对比分析了两者不同地基上模型结构体系的自振频率、加速度反应和模型地基的加速度反应规律。对比分析结果表明:数值模拟计算结果和模型试验结果虽然在数值上的差距较大,但两者反应的模型在地基地震反应特征、隔震层的隔震效果和模型隔震结构的地震反应等方面的规律基本一致。也就是说,采用振动台模型试验开展土-隔震结构动力相互作用的研究在定性规律的反应上是可行的,但在定量模拟方面还存在明显的不足。

**关键词:**软弱地基;隔震结构;模型试验;数值模拟;地震反应

**中图分类号:** TU311      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2016)04-0590-08

## Result Comparison Between Experiment and Numerical Simulation for Base Isolated Structure on Soil Ground

Yu Xu<sup>1,2</sup>, Zhu Chao<sup>2</sup>, Zhuang Haiyang<sup>2</sup>, Liu Shuai<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, 211167, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, 210009, China)

**Abstract:** Based on the shaking table test for the base isolated structure built on the soft interlayer ground and rigid foundation, a 3-D finite element model is established to simulate the dynamic soil-structure interaction, which has the same size with the test system. Then, the natural frequencies of the isolated structure and the acceleration responses of the soil-structure interaction system are compared and analyzed. As results, the experimental results given by the shaking table test are mostly consistent qualitatively, such as the natural frequency of isolated structure, the acceleration response of isolation layer, the earthquake responses of model foundation, and so on. However, the results by two different methods have obviously difference in numerical value, thus it is proved that the shaking table test can be used to simulate the earthquake responses of the dynamic soil-structure interaction qualitatively but not quantitatively.

**Key words:** soft foundation; base-isolated structure; shaking table test; numerical simulation; earthquake response

**基金项目:**江苏省自然科学基金青年基金(BK2012477)资助项目;南京工程学院校级科研基金(CKJA201505)资助项目。

**收稿日期:**2015-04-23;**修订日期:**2015-06-07

**通信作者:**庄海洋,博士,副教授,E-mail: zhuang7802@163.com。

**引用格式:**于旭,朱超,庄海洋,等:软夹层场地隔震结构动力特性试验与数值计算对比分析[J].南京航空航天大学学报,2016,48(4):590-597. Yu Xu, Zhu Chao, Zhuang Haiyang, et al. Result comparison between experiment and numerical simulation for base isolated structure on soil ground[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(4): 590-597.

SSI 效应对隔震结构动力特性以及地震动输入的影响很大,进而影响隔震结构的地震反应规律及其强度<sup>[1]</sup>。例如,Masayuki 等<sup>[2]</sup>以一个 9 层隔震结构为研究对象,考虑地基-桩-隔震结构的动力相互作用,研究了不同强度地震作用下隔震结构的动力反应特征;Mahmoud 等<sup>[3]</sup>采用数值计算方法,考虑地基-隔震结构动力相互作用,对软弱地基上底层隔震高层结构的动力反应进行了研究;Politopoulos<sup>[4]</sup>考虑基岩输入不同性质的地震动,也研究了地震动特性、SSI 效应和隔震方式对隔震结构动力反应的影响规律。国内学者刘伟庆、刘方成和尚守平等也分别采用模型试验和数值模拟等手段研究了 SSI 校应对隔震结构地震反应特性的影响规律,得出了较为近似的研究结果<sup>[5-7]</sup>。

本文作者近几年也开展了不同土性地基上 SSI 效应对基础隔震结构动力反应特征的系模型试验研究<sup>[8-11]</sup>,系统地分析了考虑 SSI 效应时基础隔震结构动力特征和地震反应规律,并基于模型的试验结果,研究了考虑 SSI 效应时桩基上基础隔震结构的简化计算方法。鉴于此,本文以软夹层地基隔震结构模型试验为依据,使用有限元软件 ABAQUS 建立了刚性地基隔震结构和软夹层地基隔震结构试验体系的三维有限元数值仿真分析模型。根据计算结果,重点对比分析了刚性地基与软夹层地基上隔震结构地震反应,以及 SSI 效应对软夹层地基上隔震结构地震反应的影响规律。

## 1 模型试验概况与有限元计算模型的建立

### 1.1 模型试验概况

为了模拟出土-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 $\pi$  定理,选取长度、加速度和隔震支座压缩应力为基本相似参数,确定实验体系相似比如表 1 所示<sup>[10]</sup>。试验采用单向激振,选用地震波为 El-Centro 波、Kobe 波、南京人工波。其中,南京人工波傅氏谱频宽最宽,Kobe 频宽最窄,而 El-Centro 波的频宽居中。软夹层地基模型试验加载方案如表 2 所示。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。

表 1 模型与原形相似比

Tab. 1 Similitude ratio between model and prototype

物理量	相似关系	相似比	
		结构	地基土
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	1/4
上部结构密度	$S_\rho = S_E / S_l$	20	
质量	$S_m = S_\rho S_l^3$	1/400	1/8 000
支座压缩应力	$S_\sigma$	1	
土体剪切模量	$S_G$		1/4
时间	$S_t = S_m / S_k$	1/4.47	1/4.47
加速度	$S_a = S_l / S_t^2$	1	1

表 2 加载工况

Tab. 2 Loading schedules

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

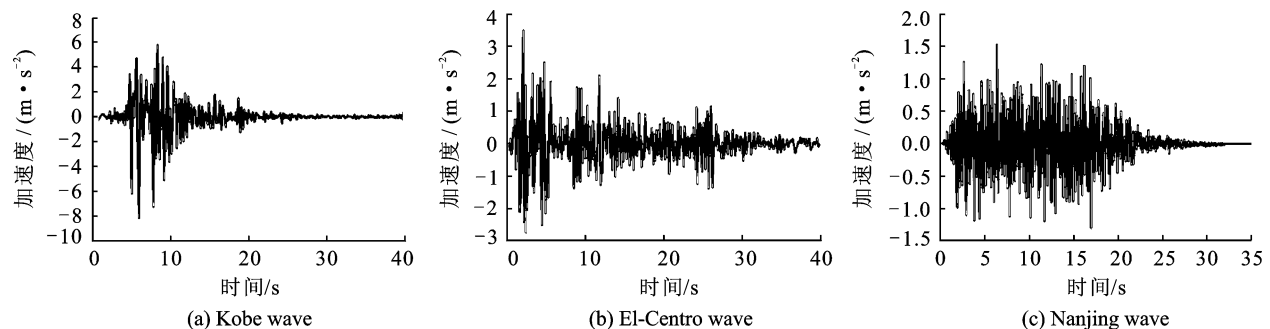


图 1 试验中输入地震波对应的加速度时程

Fig. 1 Original time-histories of acceleration when inputting different types of earthquake waves in test

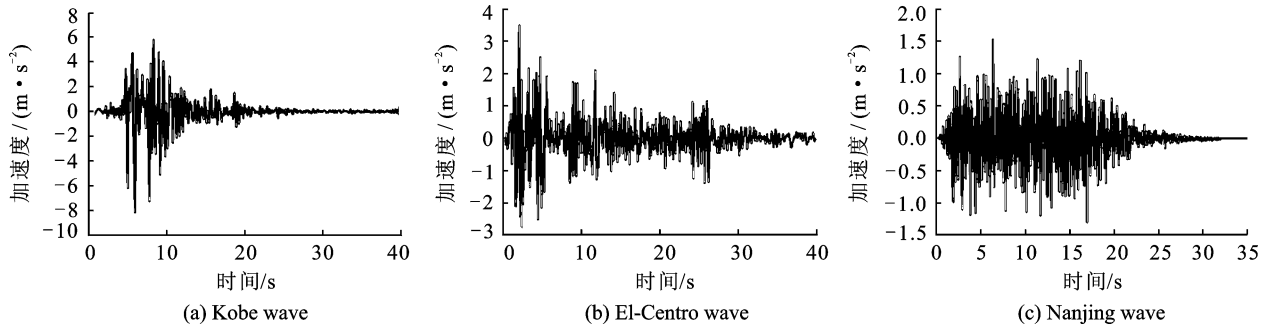


图2 试验中输入地震波对应的傅氏谱谱值

Fig. 2 Fourier spectra of acceleration when inputting different types of earthquake waves in test

振动台模型试验中上部结构采用4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736 kg,总配重3 680 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<sup>[1]</sup>。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,隔部分结构尺寸如图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高含水量黏土、0.6 m饱和密实砂土,分层土形成“软夹层地基”<sup>[1]</sup>。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<sup>[10]</sup>,该土箱可有效减小模型土层有限边界的影响。试验模型布置和现场试验如图4所示。

### 1.2 有限元计算模型的建立

本文的有限模型都严格根据振动台模型试验体系中模型结构尺寸和物理力学参数建立。模型上部结构采用4层钢框架搭建,钢框架的梁和柱均使用三维梁单元模拟,楼板层使用板单元模拟,并赋予其实际厚度。同时,通过计算将试验中各层配重质量通过增大楼板材料的密度来近似考虑。模型地基和桩基承台采用8结点实体六面体单元建模,模型桩采用三维梁单元模拟,桩土共同作用通过把桩植入土体的方法实现他们之间的相互作用,不考虑桩、土和承台之间的分离与滑移。模型体系各部分建模尺寸如图5所示。

隔震支座通过在3个方向建立线性弹簧并施加阻尼来模拟,然后分别赋予实验得出的弹簧刚度和阻尼值,使模型支座在线弹性范围内具有与实验用隔震支座具有相近的力学特性,即实验用隔震支座平均水平刚度为0.278 kN/mm,竖向刚度为197.9 kN/mm。为了缩短计算时间,减少结构约

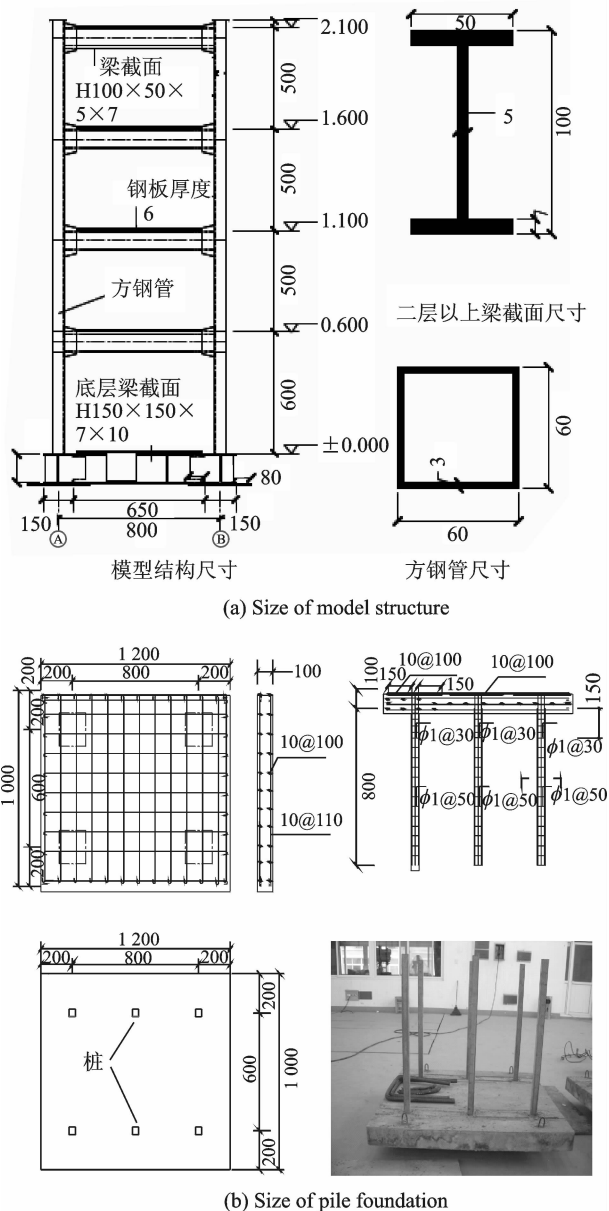


图3 模型结构与基础体系尺寸

Fig. 3 Size of model structure and pile foundation

束是非常有效的途径,将上部结构的梁柱单元在组装时进行合并,删除了梁柱之间的绑定约束。

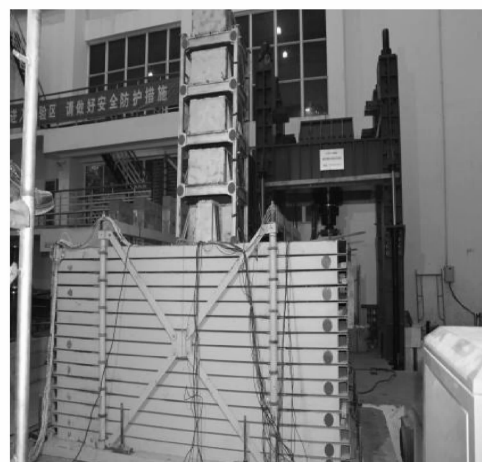
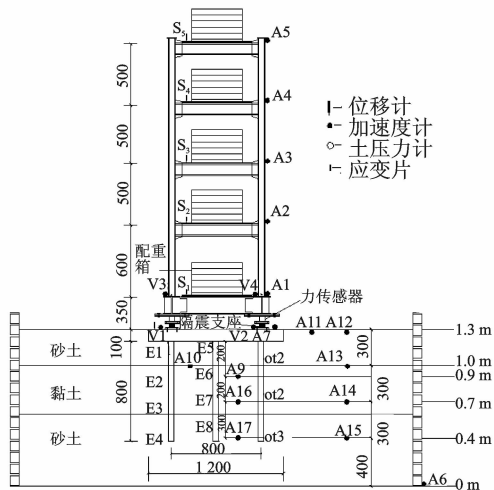


图 4 实验现场图

Fig. 4 Photo of experiment site

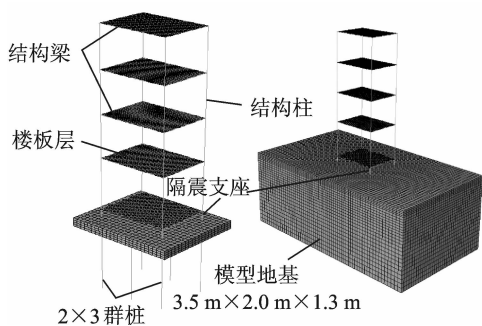


图 5 刚性地基三维有限元模型

Fig. 5 Three-dimensional finite element model for test system

表 3 模型土的物理与力学参数

Tab. 3 Physical and mechanical parameters of model soils

土层	厚度/ m	密度 $\rho$ / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	剪切波速 $V_s$ / ( $m \cdot s^{-1}$ )	泊松比	摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
粉细砂	0.3	1.76	80	0.49	17
粉土	0.4	1.93	45	0.49	18
粉细砂	0.6	1.92	120	0.49	18

## 2 试验结果与计算结果的对比分析

### 2.1 结构自振频率的对比

表 4 列出了模型试验和有限元数值计算的结构自振频率,从表中数值可以看出,模型试验所得隔震结构的自振频率明显大于数值计算的结构,而对于刚性地基非隔震结构来说,模型试验结果又明显小于数值计算的结构。总体来看,数值模型计算的结构自振频率和模型试验结果比较接近,造成它们之间差值的主要原因是因为隔震制作的计算力学参数与实际模型隔震支座的力学特性还存在明显的差距。

表 4 结构的自振频率

Tab. 4 Natural frequencies of base isolation structure on different foundations Hz

方法	基础隔震		非隔震	
	刚性地基	软夹层地基	刚性地基	软夹层地基
试验	2.65	2.4	6.72	
数值计算	2.41	2.32	6.97	5.30

### 2.2 刚性地基隔震体系加速度反应的对比分析

加速度峰值(Peak ground acceleration, PGA)反应是评估结构受地震荷载作用破坏程度的重要指标之一,同时也是抗震结构设计的重要参考依据。加速度峰值较大时,结构更易发生破坏,且破坏程度更加严重,也说明此结构的抗震性能较差。

图 6 给出了刚性地基上隔震结构体系加速度放大系数对比图。对比分析表明,模型试验和数值模拟结果均体现出了隔震结构的隔震效果。总体来看,输入 Kobe 波时,模型试验和数值模拟计算结果差距较大,且数值模拟结构明显要小于实验值,随着输入峰值的增大,两者差距有逐渐减小的趋势,造成上述差值的主要原因为隔震支座顶底间的加速度反应。当输入 El-Centro 波时,两种方法得到的隔震支座的隔震效果都比较接近,但实验中随楼层的加速度反应分布规律也存在明显的差异,即模型试验所得结构加速度反应峰值先随楼层增高而增大,但数值模拟结果表明楼层的加速度反应峰值随楼层增高而逐渐递减。当输入南京人工波时,无论是楼层加速度反应规律还是隔震支座的隔震反应,两个方法的结果均比较一致。

### 2.3 软夹层地基隔震体系加速度反应对比分析

考虑 SSI 效应后结构的地震反应变得更加复杂,地震波在向上传播的过程中频谱特性必然会发生变化,通常地表加速度峰值与承台顶的加速度峰值是不相等的。表 4 给出了输入不同地震波时承

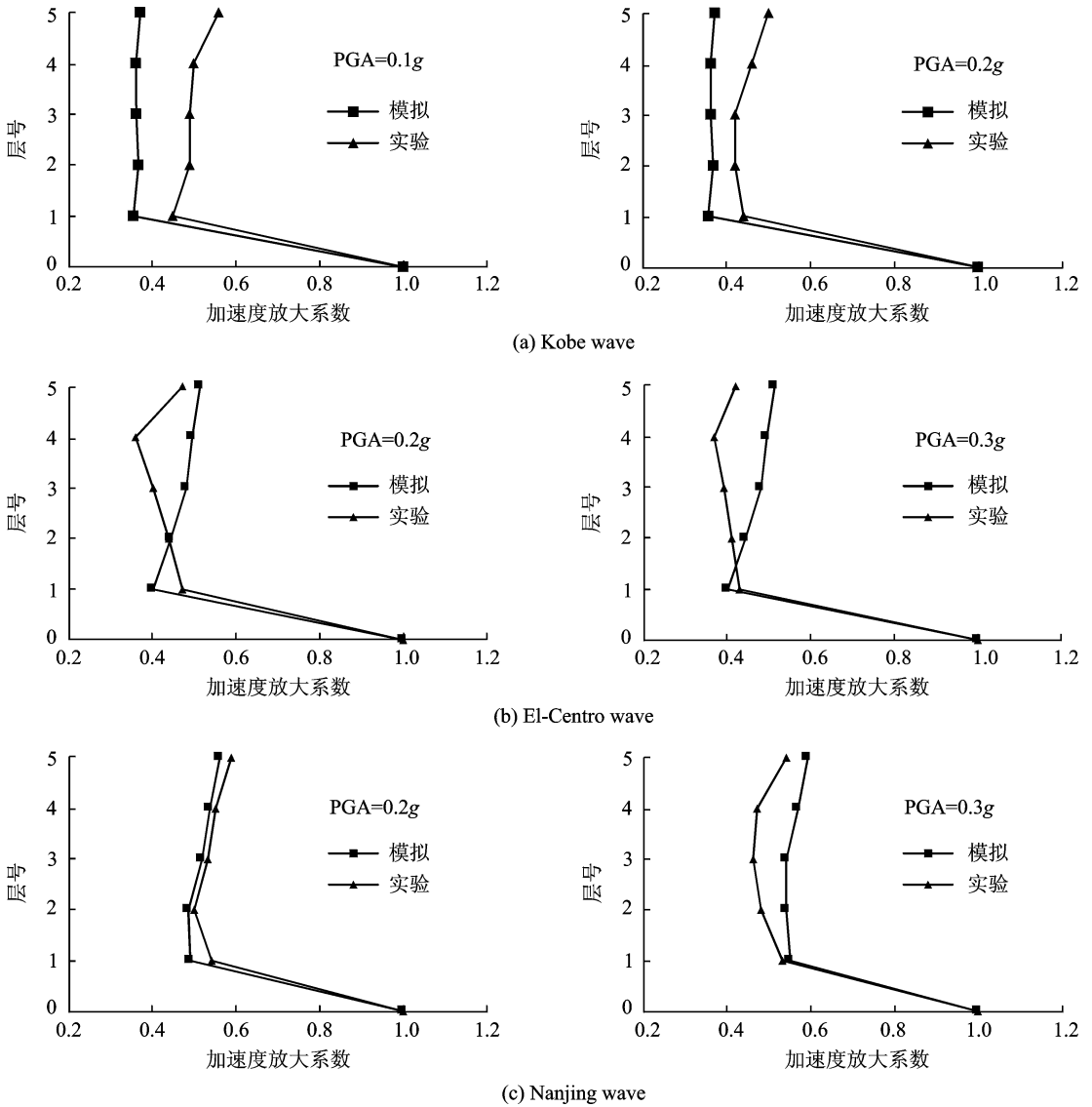


图6 实验与模拟加速度峰值对比

Fig. 6 Contrast of PGA by experiment and simulation

台顶部和土体表面的加速度实验值与计算值的比较。总体来看,从表5中误差列数值可知,数值计算和模型试验结果都表明模型地基土体表面加速度峰值基本上都大于承台顶。根据数值计算结果和模型试验结果的对比分析表明,当输入0.05g和0.15g时模型试验结果基本上都要大于模型试验结果,且两者之间的相对误差要大些。而输入0.3g和0.5g时误差则明显减小,且基本在5%左右,两者计算结果一致性较好。

图7分别给出了输入加速度峰值为0.3g时土体表面及承台顶面处加速度时程及傅里叶谱对比曲线。模型试验结果和数值计算的加速度时程曲线随时间的变化趋势基本保持一致,所对应的傅里叶谱在谱域组成以及谱值变化趋势等方面都较为相似。总体而言,数值计算结果和模型试验结果具

有较好的一致性。

表5 土体表面和承台加速度峰值比较

Tab. 5 Comparison of peak acceleration at pile cap and ground of model foundation

工况	承台顶			土体表面		
	模拟值/ (m·s <sup>-2</sup> )	试验值/ (m·s <sup>-2</sup> )	误差/ %	模拟值/ (m·s <sup>-2</sup> )	试验值/ (m·s <sup>-2</sup> )	误差/ %
El005	0.442	0.669	33.9	0.554	0.701	21.0
El015	0.798	1.091	26.8	1.001	1.201	16.7
El03	1.948	1.997	2.4	2.468	2.361	4.5
El05	2.706	3.206	15.6	3.424	3.241	5.6
KB005	0.689	1.157	39.2	0.809	1.140	29.0
KB015	1.654	2.160	23.4	1.875	2.161	13.2
KB03	2.553	3.026	15.6	2.816	3.011	6.5
KB05	3.681	3.827	3.8	4.032	4.037	0.1

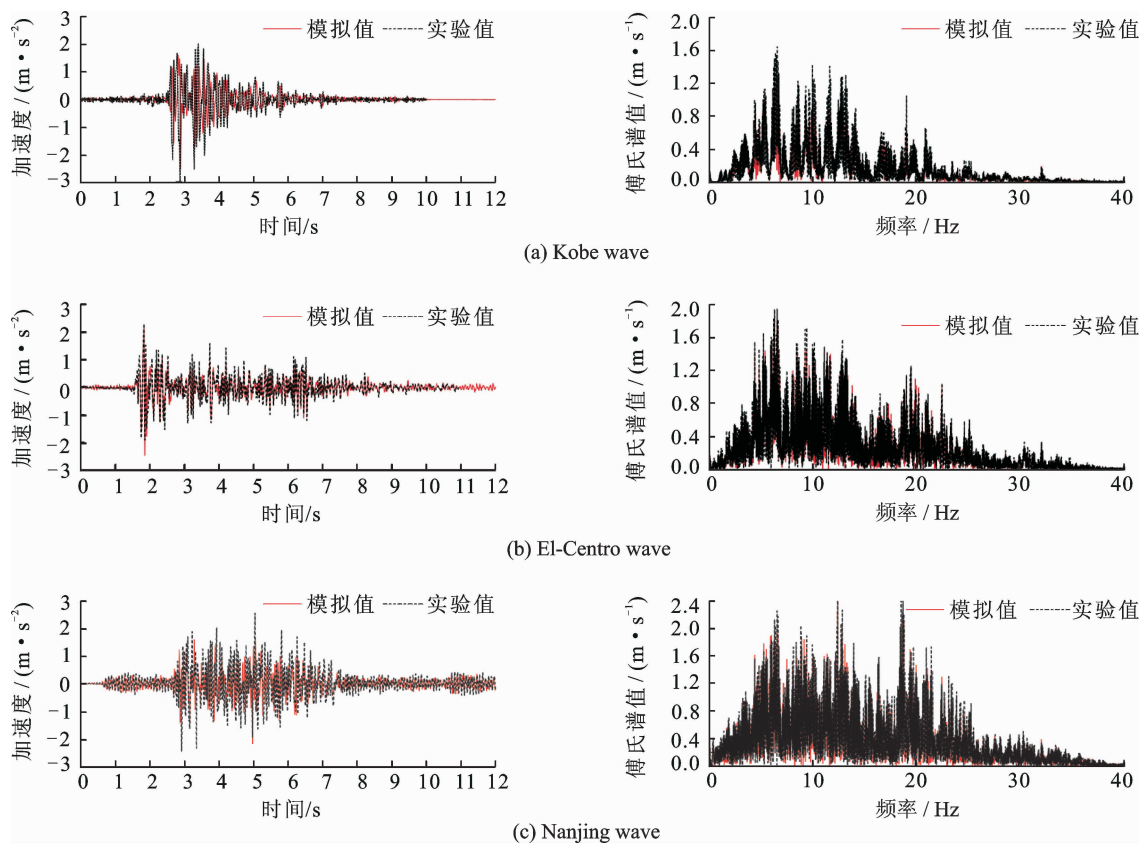
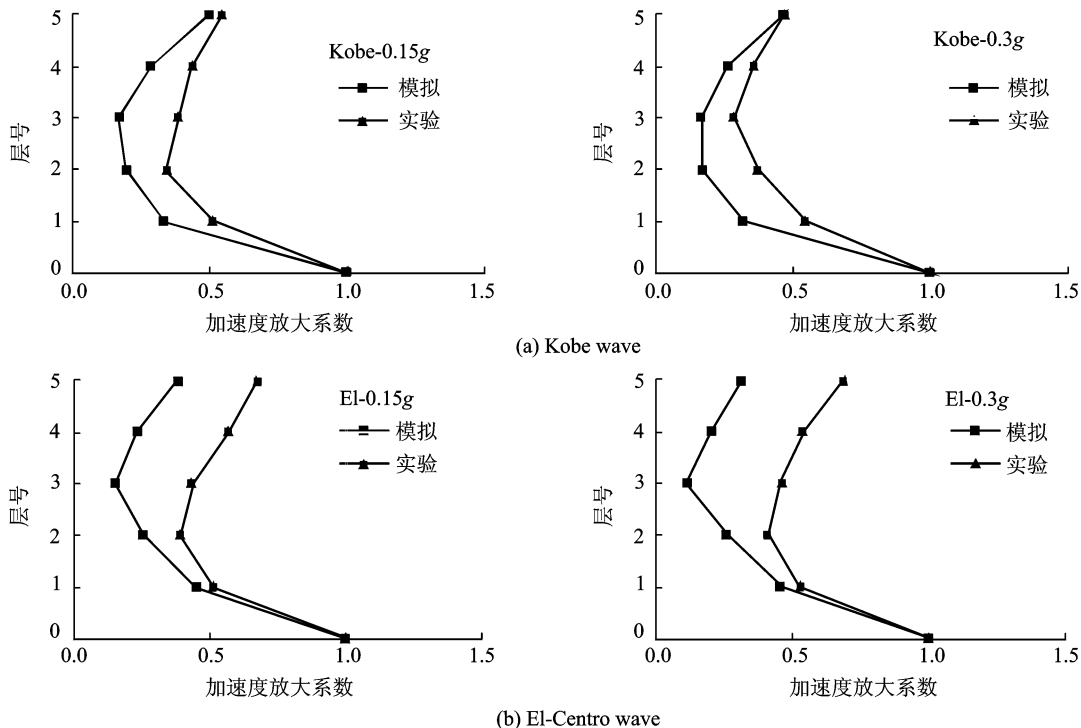


图 7 输入峰值 0.3g 时承台顶加速度峰值及傅里叶谱对比

Fig. 7 Peak acceleration and Fourier spectra of acceleration at top of pile cap and ground with input of PGA=0.3g

图 8 为楼层加速度峰值模型试验结果和数值模拟结果的对比。由图可以看出,数值计算结果明显小于模型试验结果,但从上部结构楼层加速度放大系数的变化规律来看,两种方法给出的结果是一致的。造成两者计算结果在数值上的差别主要体

现在隔震层顶部加速度反应上,即数值模拟计算的隔震层顶的地震反应明显小于模型试验结果。模型试验结果和数值模拟结果都表明,软夹层地基上部模型结构的加速度放大系数随着楼层的增高而先变小后变大。



(b) El-Centro wave

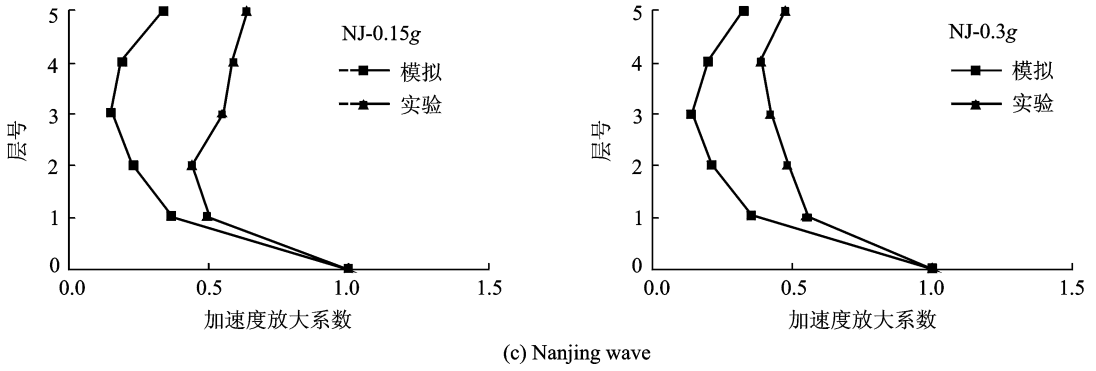


图8 实验与模拟楼层加速度放大系数对比

Fig. 8 Contrast of acceleration responses by experiment and simulation

图9为模型地基土层加速度峰值的对比,从图中可以看到地震波在地基中的传播趋势基本相同,

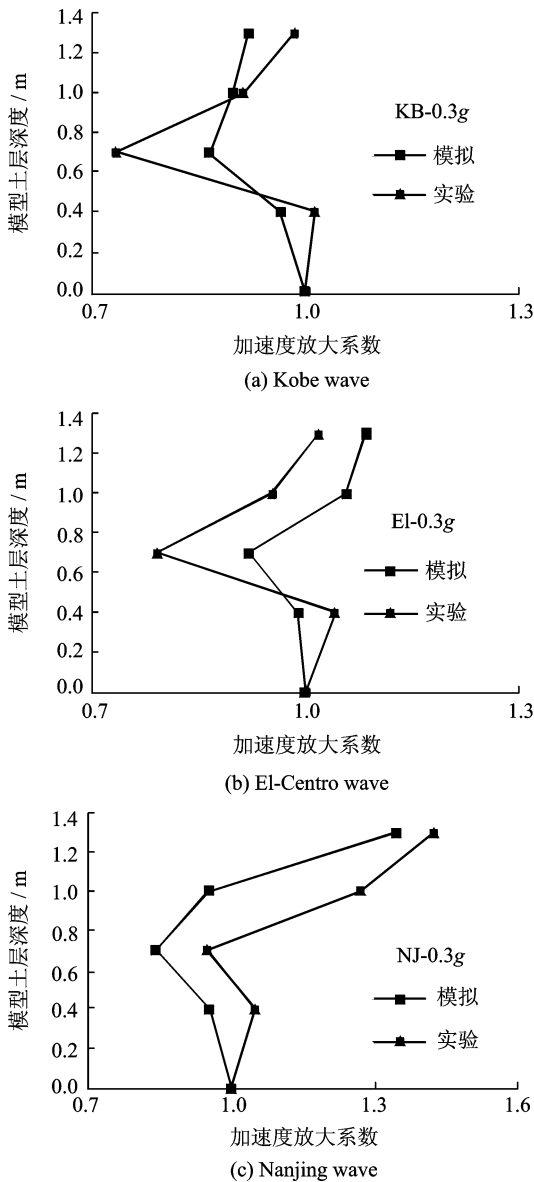


图9 输入加速度峰值为0.3g模型地基不同土层内加速度放大系数

Fig. 9 Contrast of acceleration responses of model foundation by experiment and simulation

表现为地震波在底层密实砂土中传递时峰值有可能增大也有可能减小,但数值变化不大。当进入软夹层后,加速度反应峰值迅速减小,软夹层的滤波隔震效果得以体现,传递到上层砂土中时加速度峰值又恢复到继续增大的趋势。综上可知,模型试验结果与数值模拟结果虽然存在一定偏差,但其趋势基本一致。因此可确定模型试验结果基本有效。

### 3 结论

本文针对软夹层地基上隔震结构模型试验体系,建立了等尺寸的小型三维有限元数值分析模型,对比分析了模型试验和数值模拟的结果,得出的主要结论如下:

(1)数值模态分析得出的模型结构体系的自振频率与模型试验结果非常相近,验证了本文设计的软夹层地基上模型试验体系在模拟土-隔震结构动力相互作用的可靠性。

(2)对比分析了刚性地基上模型结构加速度放大系数。总体来看,数值模拟计算结果与模型试验结果也基本一致。从数值上看,Kobe波输入时两者结果差距较大,但El-Centro波和南京人工波输入时两种结果比较接近。因此,数值计算结果较好地反应刚性地基隔震结构的地震反应规律。

(3)对比分析了软夹层地基上承台顶和土层表面加速度反应,结果表现为小震和中震时两者误差稍大,大震时误差明显减小。虽然计算的加速度峰值与模型试验结果相比有一定差距,但加速度反应的频谱特性具有很好的一致性,验证了模型试验地基土在动力学特征方面的考虑基本合理。

(4)对比分析了软夹层地基和上部模型隔震结构加速度反应的放大系数。结果表明数值模拟和模型试验结果虽然在数值上的差距较大,但两者反应的规律基本一致。也就是说,采用振动台模型试验开展土-隔震结构动力相互作用的研究在定性规

律的反应上是可行的,但在定量分析方面还存在明显的不足。

### 参考文献:

- [1] 朱超,庄海洋,于旭. 土-隔震结构动力相互作用体系振动反应特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2182-2188.  
Zhu Chao, Zhuang Haiyang, Yu Xu. Experimental study on the vibration characteristics of soil-pile-isolated structure dynamic interaction system [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(12):2182-2188.
- [2] Masayuki N, Masanori I, Toshihide K. Vertical response characteristics of aseismically isolated 9-storey building during small and large earthquakes and its dynamic soil-structure- interaction effects [J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 2010, 75(647): 77-86.
- [3] Mahmoud S, Per-Erik A, Robert J. Non-linear behavior of base-isolated building supported on flexible soil under damaging earthquakes [J]. Key Engineering Materials, Advances in Fracture and Damage Mechanics, 2012, 488/489: 142-145.
- [4] Politopoulos I. Response of seismically isolated structures to rocking-type excitations [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010, 39(3): 325-342.
- [5] 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 Fangcheng. The research on nonlinear soil structure interaction and structural seismic isolation based on SSI effect [D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [6] 刘伟庆, 李昌平, 王曙光, 等. 不同土性地基上高层隔震结构振动台试验对比研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(6): 128-151.  
Liu Weiqing, Li Changping, Wang Shuguang, et al. Comparative study on high-rise isolated structure founded on various soil foundations by using shaking table test [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(6):128-151.
- [7] 李昌平, 刘伟庆, 王曙光, 等. 土-隔震结构相互作用体系动力特性参数的简化分析方法[J] 工程力学, 2013, 30(7): 173-179.  
Li Changping, Liu Weiqing, Wang Shuguang, et al. Simplified method for calculating dynamic characteristics of soil-isolated structure system[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7):173-179
- [8] Zhuang Haiyang, 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): 208-218.
- [9] Zhuang Haiyang, Yu Xu, Zhu Chao. An efficient method for estimating the dynamic response of base-isolated structure with SSI effect[C]// Advances in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Proceedings of TC207 Conference on Soil-Structure Interaction and Retaining Walls. St. Petersburg, Russia: [s. n.], 2014:235-241.
- [10] 于旭, 宰金珉, 庄海洋. SSI效应对隔震结构地震响应的分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 44(6): 846-851.  
Yu Xu, Zai Jinmin, Zhuang Haiyang. Effects of soil-structure interaction on earthquake response of isolated structure system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 44(6):846-851.
- [11] Yu Xu, Zai Jinmin, Liu Weiqing. Experimental Research and Nonlinear Finite Element Analysis on Novel Joint between CFRT Column and Steel Beam [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 26(1):75-82.