

变截面桩基础体系高层建筑结构的地震响应

钱德玲¹, 李辉¹, 卢文胜², 李健全¹, 夏京¹

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于振动台模型试验, 采用大型软件 MARC 进行了数值仿真试验, 再现了在地震作用下桩基-结构相互作用体系的动力响应。研究表明: 基础类型变化对高层建筑结构产生的变形影响较大, 桩基-结构相互作用体系中上部结构的最大层间剪力和倾覆力矩等都比刚性地基上结构体系的要小, 桩基-结构体系中相当一部分地震能量通过支盘扩散到土层中, 减小了上部结构的变形能。而刚性地基上结构体系中相当一部分的地震能量则转化为上部结构的变形能, 导致结构损伤较大。同时, 振动台试验和数值仿真结果表明: 支盘桩结构体系的阻尼能较大, 能够有效地提高基础和结构体系的抗震和减震能力, 降低上部结构在地震作用下的地震响应, 对抵御地震、减少地震破坏具有十分重要的意义。

关键词: 振动台试验; 动力相互作用; 支盘桩; 抗震减灾; 数值仿真

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)01-0098-06

作者简介: 钱德玲(1956-), 女, 安徽安庆人, 教授, 博士生导师, 主要从事地震工程和基础工程方面的教学和科研工作。E-mail: dlqian@sina.com。

Seismic response of high-rise structures by different foundation systems

QIAN De-ling¹, LI Hui¹, LU Wen-sheng², LI Jian-quan¹, XIA Jing¹

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. State Key Laboratory on Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Dynamic response of pile foundation-structure interaction is reproduced under earthquakes in the shaking table model tests and numerical simulation tests using software MARC. The results show that the effect of deformation of high-rise structures is large because of changed pile-type. The most shear force and overturning moment of high-rise structure in squeezed branch pile interaction system are smaller than those in straight pile interaction system. The deformation energy of the structure is reduced on account of considerable seismic energy in the interaction system of squeezed branch piles and is diffused to the soil through the branch or disk, while considerable seismic energy in the interaction system of straight piles and is converted into deformation energy of the structure, resulting in greater structural damage. At the same time, the results of shaking table tests and numerical simulation show that the squeezed branch pile-foundation has more damping energy, effectively enhances seismic capability of the structure system, and reduces seismic response of the structure under earthquakes. The study is of great significance to the reduction of earthquake damage.

Key words: shaking table test; dynamic interaction; squeezed branch pile; disaster mitigation; numerical simulation

0 引言

随着时代发展和高层建筑的兴起, 桩基在材料、桩型和施工技术上发生了很大的变化。钢桩、钢筋混凝土桩代替了原始的木桩, 桩型已不再是单一的直杆桩, 变截面桩如雨后春笋一样逐步在工程中得到广泛的应用, 如扩底桩、支盘桩、糖葫芦桩等。多年来, 桩基的研究比较集中在直杆桩方面, 而对变截面桩的研究甚少, 特别是桩基的动力相互作用。

动力相互作用的研究是一个新颖而又极其复杂的课题, 近 20 多年来, 无论是建筑结构工程还是桥梁工

程, 人们都致力于直杆桩-土-结构体系(简称直杆桩体系)的动力试验^[1-6], 而对于变截面桩-土-结构体系的研究, 特别是振动台模型试验的研究进行的很少。为了探索不同桩型在地震作用下对高层建筑结构产生的动力响应, 本文通过振动台模型试验和数值仿真试验, 了解和观察桩-土-结构体系动力相互作用的响应规律, 验证或寻找新型桩基与结构抗震性能的

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772171; 50278030); 安徽省自然科学基金项目(050450402)

收稿日期: 2009-10-20

差异以及震害特点。鉴于变截面桩具有较高的抗拔、抗压承载力和抗扭曲性能以及对地震动的阻抗特性等,本文开展了对一种新型变截面桩(支盘桩)-高层建筑结构体系动力相互作用的研究。研究表明:动力相互作用体系中,基础形式不同(支盘桩和直杆桩),上部结构的动力响应也不同;在相同的地震波激励下,高层建筑结构的最大位移、最大层间剪力和倾覆力矩等均发生了较大变化。研究结果为选用抗震性能较好的基础形式提供了有力的依据,在抗震减灾方面具有重要的研究意义。

1 振动台试验概况

1.1 土层物理性质及容器

振动台试验在上海同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行的,该实验室振动台台面尺寸为 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$,最大载荷重量 25 t 。模型设计为上部结构采用双向单跨 12 层钢筋混凝土框架,桩基础为 5 根挤扩支盘桩,模型土为一次性制样,分为 3 层,自上而下分别为粉质黏土、砂质粉土和砂土,试验前后土的物理性质见表 1。该模型的缩尺比例为 $1/10$,质量密度相似系数 $S_\rho=1$,土、结构的弹性模量相似系数均为 $S_E=3.76$ 。按照 Bockingham π 定理导出了各物理量之间的相似关系式和相似系数^[7-9]。支盘桩-地基-上部结构体系的振动台模型试验共进行了 39 个工况的振动激励,为了解竖向地震对该体系动力相互作用的影响,试验中采用了单向(X 向)和双向(X 向和 Z 向)地震波输入。台面输入波形为 EL Centro 波、上海人工波及 Kobe 波;加速度峰值按中国抗震规范的震中烈度加速度值对应输入,从小到大以小量级逐渐加入,并按相似关系调整加速度峰值和时间间隔,各工况输

入峰值见文献[10]。模型与原型地基基础与上部结构的设计方案如表 2 所示。

模型箱采用直径为 3 m 的圆桶形容器, 为了减小模型箱效应 (即模型箱里的土在地震作用下应以与原型自由场同样的方式变形), 圆桶侧壁采用厚 5 mm 的橡胶膜, 在圆桶外侧用 $\Phi 4@60$ mm 的钢筋作圆周式加固, 以使橡胶膜圆桶具有一定的刚度, 同时能够让土体作层状水平剪切变形^[11]。模型设计及模型照片如图 1 所示。



图 1 模型照片

Fig. 1 Photo of model

试验中采用加速度传感器和位移计量测上部结构的动力响应,在支盘桩上黏贴应变传感器,并在桩土界面上埋设土压力盒以量测接触压力,土中埋设孔隙水压力传感器量测孔隙水压力的变化情况。

1.2 台面输入波形

试验选用的地震波形有 EL Centro 波, 上海人工波及 Kobe 波, 某些工况同时输入 X 向和 Z 向双向 EL Centro 波和 Kobe 波。图 2, 3 分别为 EL Centro 波和上海人工波的加速度时程曲线及傅氏谱^[11]。

表 1 十样的物理性质试验结果

Table 1 Test results of soils

编号	土样名称	试样取自	重度/(kN·m ⁻³)	含水率/%	比重	孔隙比	饱和度/%
土层 1	粉质黏土	试验前	18.6	27.4	2.72	0.863	86.4
		试验后	19.2	28.1	2.72	0.815	93.7
土层 2	砂质粉土	试验前	18.8	23.4	2.70	0.772	81.8
		试验后	20.0	25.3	2.70	0.692	98.7
土层 3	砂土	试验前	16.4	4.8	2.67	0.706	18.2
		试验后	17.0	3.6	2.67	0.627	15.3

表2 原型与模型的尺寸对比

Table 2 Sizes of prototype and model

项目	层数 /m	层高 /m	框架柱网	框架梁截面 (宽×高)/mm	框架柱截面/mm	楼板板厚/mm	承台板尺寸 (长×宽×厚)/m	支盘桩桩长/m	桩截面尺寸 (桩径/盘径)/mm	地基土(厚度×直径)/m		
										粉质黏土	砂质粉土	砂土
原型	12	3	6×6	300×600	500×600	120	7×7×1	12	Φ600/Φ1400	2.5×30	9×30	0.45×30
模型	12	0.3	0.6×0.6	30×60	50×60	12	0.7×0.7×0.1	1.2	Φ60/Φ140	0.25×3	0.9×3	0.45×3
数量					4×12 根	4×12 根	1×12 块	1 块	5 根			
位置										第一层	第二层	第三层

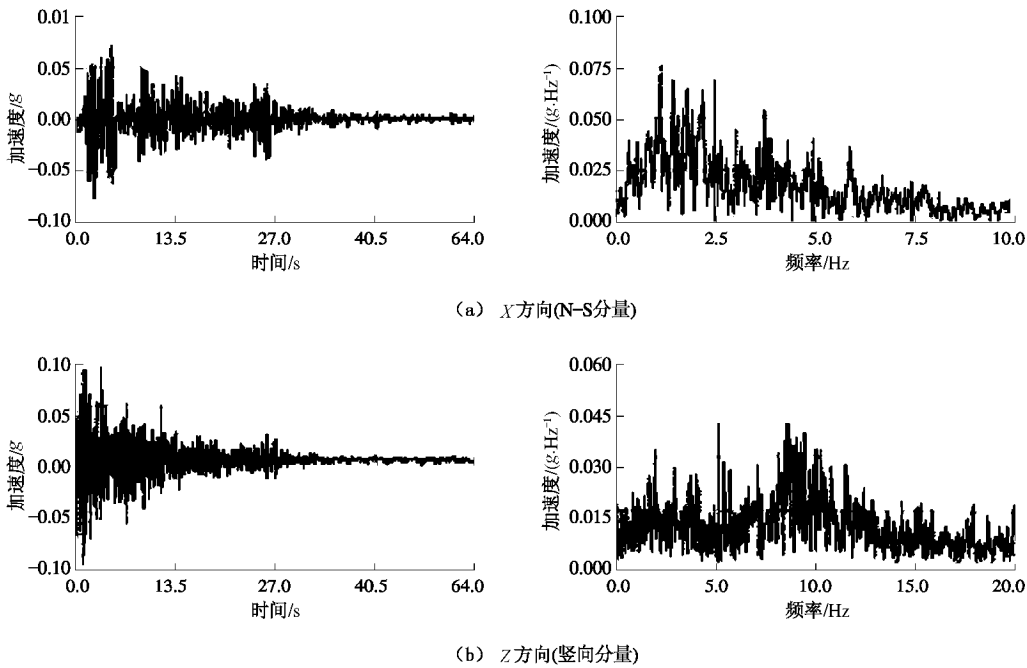


图 2 EL Centro 波时程及其傅氏谱

Fig. 2 Time history curves of acceleration and Fourier spectrum at EL centro wave

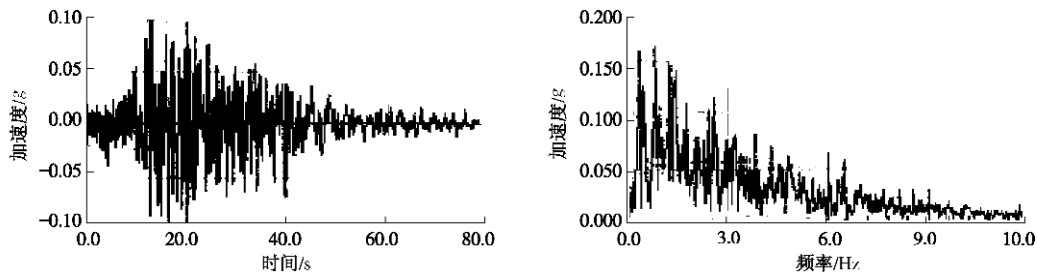


图 3 上海人工波时程及其傅氏谱

Fig. 3 Time history curves of acceleration and Fourier spectrum at SH wave

图 4 是土体中测点的加速度记录, S1 加速度传感器位于土箱底部, S4 位于承台底部, 由图 4 可以看出, 在较大能量的上海人工波输入下, 地震波从土箱底部传到承台底部和土体表面的过程中, 其加速度峰值由

2 逐渐下降到 1, 折减约 50%, 支盘桩 - 土体系对地震波起到了明显的滤波减震作用。地震波激励下各测点加速度时程除峰值有所变化外, 其波形没有明显改变, 说明在地震激励下支盘桩 - 土体系能够有效的吸收振动能量, 减振效果明显。

2 数值仿真试验

在振动台试验中, 由于传感器的损坏, 有些重要的数据采集不到或被丢失, 给分析带来较大的困难。因此, 基于振动台试验的结果, 进行了有限元计算, 获取了相关的信息。有限元计算采用美国 MSC 公司生产的大型商业软件 MARC, MARC 具有功能齐全的高数值稳定性、高精度和快速收敛的高度非线性问题求解技术和极强的结构分析能力, 可以处理各种线性和非线性结构动力分析问题。根据本次振动台模型试验的几何尺寸、填土性质以及台面输入等实际情况, 采用了 3D 模型 (见图 5)。该几何模型完全和振动台试验模型 (图 1) 相同, 材料性质、密度、时间、阻

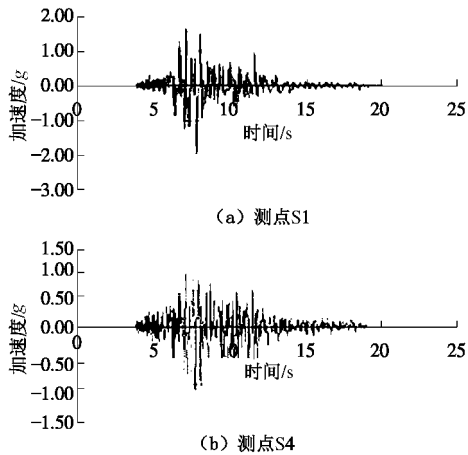


图 4 SH6 工况下测点 S1, S4 的加速度时程曲线

Fig. 4 Time history curves of acceleration at points S1, S4 in SH6 situation

尼及加速度等均按相似率输入。在载荷工况上, 进行了静力分析、模态分析和动力时程分析, 通过建模和边界处理, 得到图 5 的计算模型和图 6 的计算结果。从图 6 曲线上可知, 计算结果与试验结果吻合的较好, 计算结果可以与试验结果进行对照研究和分析。

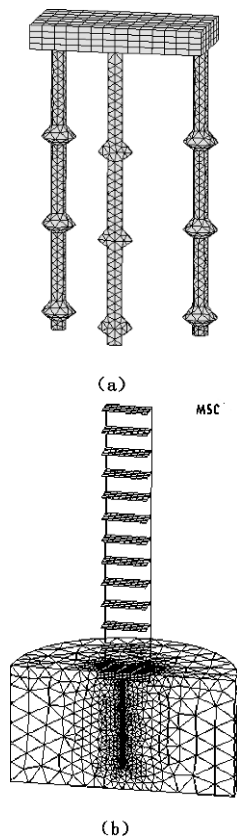


图 5 1/2 计算模型

Fig. 5 1/2 model of numerical simulation

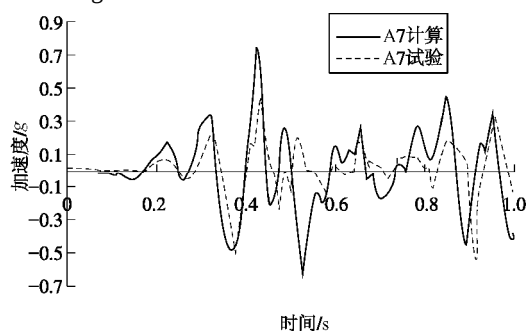


图 6 结构顶点数值计算与振动台试验结果的比较

Fig. 6 Comparison between numerical simulations and shaking table tests on structure top

3 相互作用体系和刚性地基对高层建筑结构产生的层间剪力和倾覆力矩的对比

刚性地基上的振动台试验时, 框架结构直接固定在振动台台面上, 因此台面输入加速度就是结构底部自由场的地震加速度。而对于相互作用体系的振动台

试验, 土箱容器固定在振动台台面上, 框架结构置于土中的支盘桩基础上, 振动台的台面地震波通过土层、基础, 传播到结构底部。因此, 由于地震波输入点不同, 两个作用体系产生的动力响应也不同。通过振动台的实测数据, 经计算整理后, 绘出了图 7, 8。图中 ZP10 为相互作用体系, S10H 为刚性地基体系 (据吕西林教授研究小组资料)。

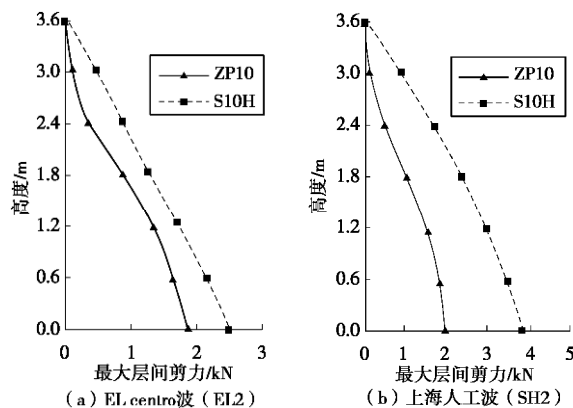


图 7 上部结构最大层间剪力的对比

Fig. 7 Comparison of largest shear forces in high-rise structure

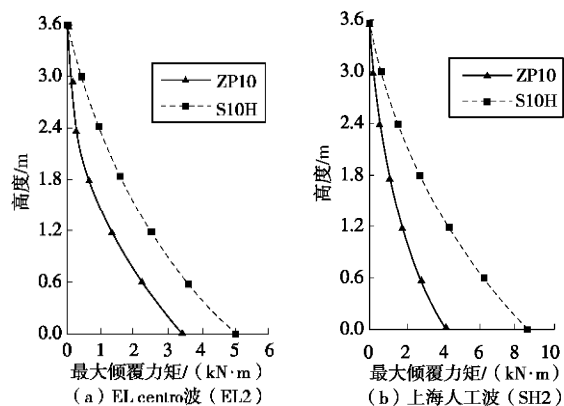


图 8 上部结构最大倾覆力矩的对比

Fig. 8 Comparison of largest overturning moments in high-rise structure

图 7 为两个试验的上部框架结构的最大层间剪力反应对比, 图 8 为上部框架结构的最大倾覆力矩对比。由图中数据表明: 相互作用体系 ZP10 上部结构的层间剪力、倾覆力矩明显小于刚性地基上 S10H 试验的情况, 且随着输入激励的增大, 该规律不变。当体系为刚性地基时, 振动能量全部被结构吸收, 而对于相互作用体系, 仅一部分能量被结构吸收, 另一部分则为土体和基础吸收和耗散。因此, 在地震动作用下考虑相互作用时, 结构的层间剪力、倾覆力矩等通常都比刚性地基上的小, 相同条件下结构破坏程度也相对较小。

4 顶层竖向位移的对比

图 9 是在相同动荷载作用下两个体系结构顶层在

Z 方向上的位移, 很明显, 支盘桩体系的顶层位移比直杆桩体系要小的多。这主要是由于支盘桩具有较强的抗压、抗拔和抗扭曲的阻抗性能, 使得结构顶层产生的竖向位移较小, 很显然, 直杆桩的抗拔效果较差。

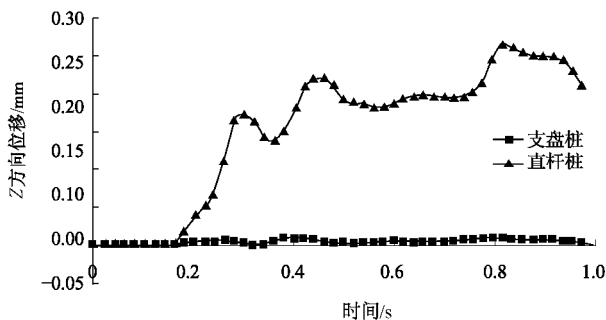


图 9 结构顶层位移的比较

Fig. 9 Comparison of displacements in structure top

5 结构位移的对比

图10是在EL1工况下计算出来的框架结构位移曲线。从图10上看, 支盘桩体系中上部框架结构的水平位移比直杆桩体系小的多, 特别是在结构的顶部, 扣除平动位移后, 直杆桩体系的摆动位移是4.3 mm, 支盘桩体系是1.3 mm, 高出支盘桩体系3倍多。说明在振动荷载作用下, 支盘具有较大的减震和耗散能量的作用, 有效的减少了上部结构的位移幅值, 而直杆桩体系中这种阻抗作用主要靠桩-土之间的摩擦力来承担。地震时, 上部结构的位移过大, 容易产生整体倾斜(或倾覆)、扭曲振动等现象, 这也是高层建筑物在地震作用下经常发生的一些震害现象。因此, 在工程实际中, 特别是多地震区域里, 可以考虑支盘桩作为基础。

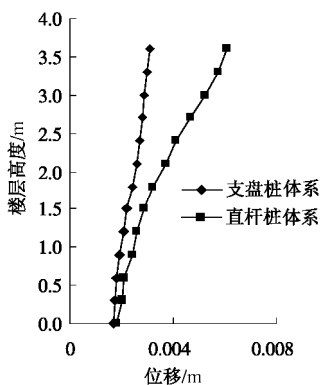


图 10 结构位移的比较

Fig. 10 Comparison of displacements in the structure

6 桩顶接触压力的对比

在模型制作时, 桩顶钢筋与承台主筋是连接的, 因此, 在地震作用下, 桩顶和承台共同作用, 除了承受地震荷载, 还承受上部结构反馈给基础的动能和变形能。图11是桩顶接触压力曲线, 明显地看出, 直杆

桩的接触压力比变截面桩要高出三倍多。接触压力越大, 桩顶破坏程度也就越大。大部分地震中承台和桩顶连接部位是薄弱环节, 易折断和碎裂, 损坏部位主要在桩头和承台连接处以及承台下的桩身上部, 由压、拉、剪压等导致破坏, 如图12阪神地震力引起的桩基破坏。试验中也是如此, 直杆桩的裂缝主要分布在桩头及桩身上部, 而支盘桩裂缝很少, 几乎不明显。

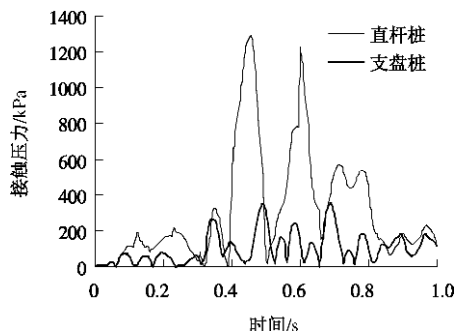
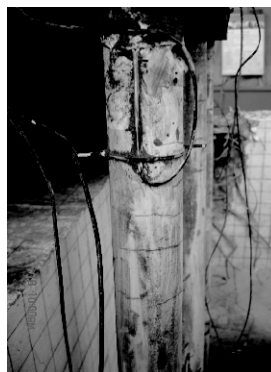


图 11 不同桩型的桩顶接触压力对比

Fig. 11 Comparison of contact forces at top of different piles



(a) 阪神地震中桩头破坏



(b) 试验中直杆桩裂缝

图 12 桩基破坏

Fig. 12 Breakage of pile foundation

7 结 论

在振动台试验的基础上, 通过对比支盘桩-地基-上部结构相互作用体系和直杆桩-地基土-上部结构相互作用体系的有限元数值计算结果, 分析了桩型变化对高层建筑结构产生的动力相互作用的响应, 得到一些有益的结论:

(1)在地震动作用下支盘桩相互作用体系中上部结构的层间剪力和倾覆力矩等通常都比刚性地基上结构体系的要小。这主要是因为支盘桩体系中相当一部分的地震能量通过支盘扩散到土层中,上部结构的变形能较小,而体系为刚性地基时,地震能量全部被结构吸收,并转化为上部结构的变形能,导致结构损伤较大。

(2)振动台试验和数值仿真结果表明:支盘桩能够有效地提高基础和结构体系的抗震、减震能力,降低上部结构在地震力作用下的动力反应,对抵御地震、减少地震破坏具有十分重要的意义。结构-地基动力相互作用对体系地震反应的影响很显著,在深入研究的基础上,有必要对刚性地基假定和现行结构抗震设计方法作出改进。

参考文献:

- [1] 吕西林, 陈跃庆, 陈波, 等. 结构-地基动力相互作用体系振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 20 - 29. (LÜ Xi-lin, CHEN Yue-qing, CHEN Bo, et al. Shaking table testing of dynamic soil-structure interaction system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(4): 20 - 29. (in Chinese))
- [2] 李培振, 陈跃庆, 吕西林, 等. 较硬分层土-桩基-结构相互作用体系振动台试验[J]. 同济大学学报, 2006, 34(3): 307 - 313. (LI Pei-zhen, CHEN Yun-qing, LÜ Xi-lin, et al. Shaking table testing of hard layered soil-pile-structure interaction system[J]. Journal of Tongji University, 2006, 34(3): 307 - 313. (in Chinese))
- [3] LU X L, CHEN Y Q, CHEN B, et al. Shaking table model test on dynamic soil-structure interaction system[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2002, 1(1): 55 - 63.
- [4] 史晓军, 岳庆霞, 李杰. 土-结构动力相互作用振动台试验中模型地基影响因素分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(4): 50 - 53. (SHI Xiao-jun, YUE Qing-xia, LI Jie. Influence factor analysis of foundation model in shaking table test considering soil-structure dynamic interaction[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(4): 50 - 53. (in Chinese))
- [5] LUCO J Enrique. A simple model for structural control including soil-structure interaction effects[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1998, 27(3): 225 - 242.
- [6] MEYMAND P. Shake table tests: seismic soil pile superstructure interaction[J]. PEER Center News, 1998, 1(2): 1 - 4.
- [7] 吕西林, 陈跃庆. 结构-地基相互作用体系的动力相似关系的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(9): 85 - 92. (LÜ Xi-lin, CHEN Yue-qing. Study on dynamic similitude theory of soil-structure interaction system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(9): 85 - 92. (in Chinese))
- [8] 杨树标, 杜广辉, 李荣华, 等. 结构动力模型相似关系研究及验证[J]. 河北工程大学学报, 2008, 25(3): 4 - 7. (YANG Shu-biao, DU Guang-hui, LI Rong-hua. Research of similitude laws for dynamic structural model test[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2008, 25(3): 4 - 7. (in Chinese))
- [9] 宋二祥, 武思宇, 王宗纲. 地基-结构系统振动台模型试验中相似比的实现问题探讨[J]. 土木工程学报, 2008, 41(10): 87 - 92. (SONG Er-xiang WU Si-yu, WANG Zong-gang. A tentative solution for similitude realization in shaking table tests of SSI systems[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(10): 87 - 92. (in Chinese))
- [10] 钱德玲, 赵元一, 王东坡. 桩-土-结构体系动力相互作用的试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(11): 1856 - 1861. (QIAN De-ling, ZHAO Yuan-yi, WANG Dong-po. Experimental study on the dynamic interaction of squeezed branch pile-soil-structure system by shaking table test[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(11): 1856 - 1861 (in Chinese))
- [11] 吕西林, 陈跃庆. 高层建筑结构-地基动力相互作用效果的振动台试验对比研究[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(2): 42 - 48. (LÜ Xi-lin, CHEN Yue-qing. Study on effect of soil-structure interaction by shaking table test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(2): 42 - 48. (in Chinese))