

文章编号:1673-2049(2007)04-0050-04

# 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

史晓军,岳庆霞,李 杰

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

**摘要:**为了给出土-结构动力相互作用大型振动台试验中模型地基设计的一般原则,结合各国已有的典型试验中模型地基的动力响应实测结果,以加速度峰值放大系数及其傅里叶幅值谱为分析依据,从边界效应、模型地基高度、土体含水量及地震波输入次数4个方面对模型地基的振动性态进行了比较分析。结果表明:土箱刚性、土的自振特性、地基高度、土体含水量及地震波的输入次数是影响模型地基动力特性的主要因素,并提出了相应的控制原则。该结论可为同类试验中模型地基的设计和试验的顺利开展提供有益的参考。

**关键词:**土-结构动力相互作用;振动台试验;加速度放大系数;模型地基;土箱;边界效应

中图分类号:TU411.8

文献标志码:A

## Influence Factor Analysis of Foundation Model in Shaking Table Test Considering Soil-structure Dynamic Interaction

SHI Xiao-jun, YUE Qing-xia, LI Jie

(School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The general principle of large scale shaking table test of soil-structure dynamic interaction was investigated. Taking the amplification coefficients of peak acceleration and its corresponding Fourier amplitude spectrum as main factors, the measured results of existing typical shaking table tests were analyzed and the vibration behaviors of foundation model were compared in terms of boundary effect, height of foundation model, moisture content of soil and numbers of input seismic waves. The results show that the main factors affecting vibration behavior of foundation model are stiffness of soil box, self-vibration behavior of soil, foundation height, moisture content of soil and numbers of input seismic waves. At the same time, the corresponding control principles are proposed. These conclusions will be very helpful for the future test design of foundation model.

**Key words:** soil-structure dynamic interaction; shaking table test; acceleration amplification coefficient; foundation model; soil box; boundary effect

## 0 引言

在地震中,土与结构的相互作用是一个极其复

杂的问题,它涉及结构工程、岩土工程和地震工程等几个不同的研究领域<sup>[1-2]</sup>。目前,土-结构相互作用研究已成为抗震工程领域中的重要课题,而且在理

收稿日期:2007-09-20

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(50321803);国家自然科学基金项目(50621062)

作者简介:史晓军(1974-),男,山西阳泉人,工学博士研究生,E-mail:sxj149@163.com。

论分析和数值模拟上取得了不少成果。然而,由于对所涉及问题考虑的影响因素不同,不同的计算方法或模型得出的结果之间常有较大的差异,为了验证此理论的可靠性和有效性以及对土-结构相互作用机理的深入认识,进行大型振动台试验研究是必要的。

1 试验数据

在土-结构动力相互作用的大型振动台试验中,模型地基是试验实施的载体,其设计合理与否不仅影响模拟实际地震中地基土体动力响应的有效性,且直接影响试验目标的实现和试验结论的正确性。因此,笔者就几个典型的大型振动台试验,对影响模

型地基动力响应的相关因素进行综合分析,以期得出有利于试验设计的一般性原则。土-结构相互作用试验数据见表 1。

2 边界效应

为了合理模拟实际地基,模型地基在平面上应取得足够大,但限于振动台的平面尺寸和承载力,一般将模型地基置于一个有限的空间即土箱中,由此增加了人工边界。在动力试验中,这种边界不仅对模型地基变形产生约束,而且这种约束会在模型地基中产生不同于实际地震作用下波的反射和散射,这些影响一般统称为模型箱效应或土箱效应。模型箱效应对试验结果产生严重影响。

表 1 土-结构相互作用相关试验数据  
Tab. 1 Relevant Data of Soil-structure Interaction Test

数据来源	土箱性质	土箱尺寸/m	土质	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	土体含水量/%	模型地基高度/m	地震波
文献[3]	柔性	2.0×1.5×2.0	细黄砂	1.509~1.607	0.5	2.00	El Centro 波
文献[4]	柔性	11.6×3.0×4.8	干砂	1.550		4.75	Kobe 波
文献[5]	刚性	3.5×0.7×3.2	砂土	1.460~1.650	7.0	3.00	Kobe 波
文献[6]	刚性	2.7×0.8×1.2	细干砂(标准砂)			1.00	Kobe 波
文献[7]	柔性	3.0×2.1(圆形)	砂质粉土	1.800	27.8~40.5	1.60	El Centro 波
文献[8]	刚性	3.0×2.5×1.2	黏土	1.900	30.0~33.0	1.00	上海波

2.1 土箱刚性

目前,各国用于振动台试验的土箱有刚性土箱和柔性土箱两类<sup>[9-12]</sup>。研究表明,柔性土箱的试验效果较好。图 1 为文献[3]和文献[4]中柔性土箱试验的结果。一般定义土体中加速度响应峰值与基底输入峰值的比值为加速度放大系数。从图 1 可见,在地震峰值加速度不太大的情况下,土体从基底到土表方向上各点的加速度放大系数大于 1,这与实际地震观测结果相符。随着输入地震动强度的增加,峰值加速度放大系数逐渐减小,直至小于 1,这表明土体在强地震作用下地基中一定深度处土体发生非线性破坏,形成软弱层,使能量无法传递到地基上部,从而导致加速度降低。由此可看出,柔性土箱中模型地基能够比较真实地反映实际的地震动特性。

与之相比,刚性土箱中地基的模拟效果则不够理想。如图 2 所示,文献[5]中的模型地基同样使用干砂,但在峰值加速度为 0.40g~0.50g 的情况下,在模型地基中部的加速度放大系数仍远大于 1,这表明地基土体的非线性发展较柔性土箱小。文献[6]中的研究也出现了相同的现象,因此,这种结果很可能是刚性箱体约束土层状剪切变形所致。

若要采用刚性土箱,则在振动方向上的箱体长

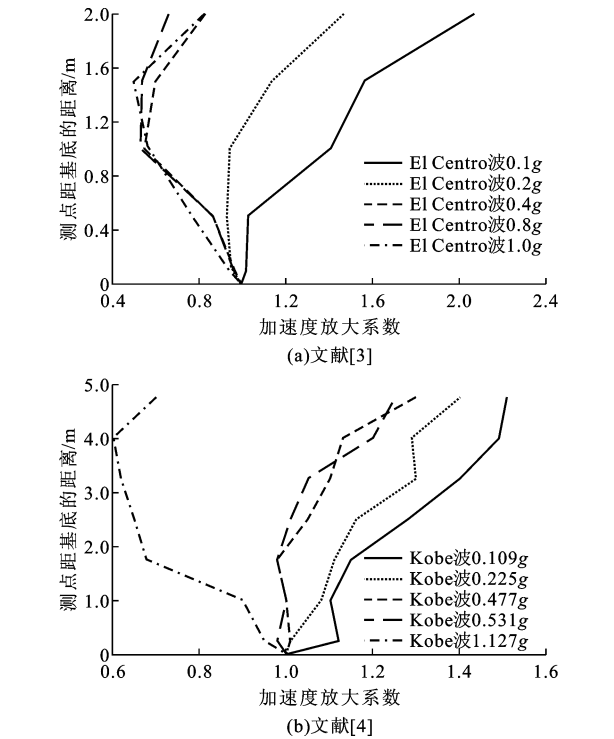


图 1 柔性土箱试验中土体加速度放大系数  
Fig. 1 Acceleration Amplification Coefficients of Soil in Flexible Soil Box Test  
度应大于其高度的 4 倍<sup>[13]</sup>。对大型振动台试验而

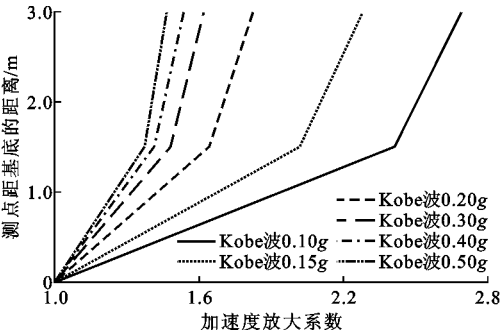


图 2 文献[5]刚性土箱试验中土体加速度放大系数

Fig. 2 Acceleration Amplification Coefficients of Soil in Stiffness Soil Box Test of Reference [5]

言,这可能超过了一般振动台的试验能力。为此,这类土箱往往通过在箱内壁黏贴泡沫塑料等柔性材料来降低模型箱效应,但柔性材料的选取依然会对振动台试验产生影响。因为,确定材料的薄厚没有一定的原则,太薄效果可能不理想,太厚则可能在振动中受土体挤压而变刚,同时还可能因其挤压变形而造成土体的大沉降,故刚性土箱模型箱效应的消除较为困难。

2.2 土箱自振频率

模型地基实际是一个由土体和土箱组成的系统,各自的振动特性都会对系统的振动性态产生影响。由于模型地基是主要研究对象,所以为了使土箱本身的振动不致影响其内模型地基自身的动力响应,土箱的自振频率须远离模型土体的基频。同理,为避免土箱阻尼对模型地基的影响,其阻尼应低于土体的阻尼。

3 模型地基的高度

模型地基的高度对试验的影响来源于 2 个方面。一方面是土体的高频滤波作用。文献[3]试验中沿模型地基竖向中线上基底  $A_1$  点和表面  $A_9$  点处的加速度响应傅里叶幅值谱见图 3。从图 3(a)、(b)可知,土体相当于是一个低通滤波器,地震波经过一定距离的传播后高频成分衰减,低频分量被保留和放大。因此,模型结构距基底越远,其接受到的地震波输入与基底地震波输入的差别越大。另一方面,由于土箱效应不可能完全避免,当模型地基过高时,地震波沿箱壁高度的反射波会在土体上部累积,使该处地震波频率成分杂化,这种现象在高强度输入下尤其明显[图 3(c)、(d)]。然而,大多数地震波是在地表处测得的,如果研究结构在某地震波输入下的响应,在上述情况下,由于结构模型处的地震波

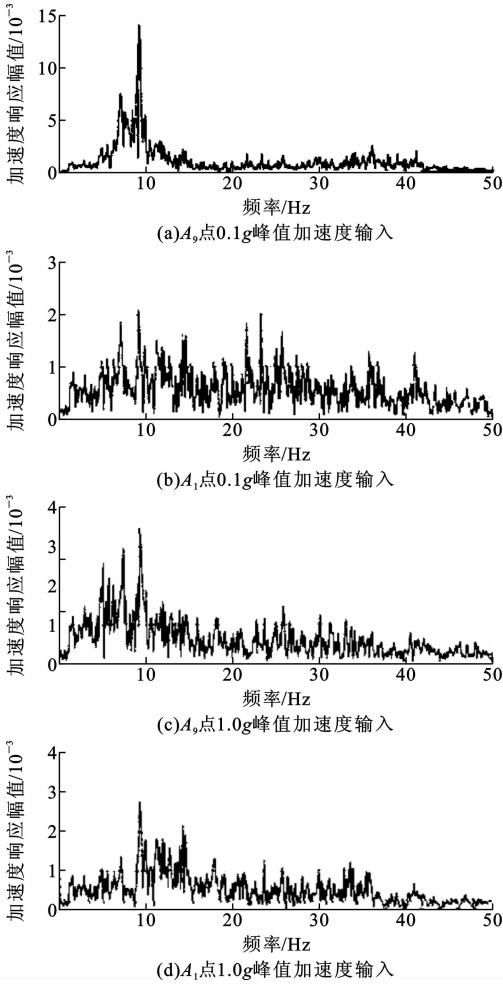


图 3 文献[3]试验中 El Centro 波输入下土体加速度响应的傅里叶幅值谱

Fig. 3 Fourier Amplitude Spectrum of Soil Acceleration Response Under El Centro Wave in Test of Reference [3]

被严重干扰,可能会使试验无法得到合理或正确的结果,所以在平面尺寸一定的情况下,模型地基的高度除满足埋置结构模型所需的深度外,一般不易过高。此外,模型地基太高有可能会使土箱和模型地基组成的系统产生弯曲振动以及带来安全稳定性的问题。

4 土体含水量

土体含水量是影响模型地基动力响应的另一主要因素。含水量增加会导致土体剪切强度及剪切刚度的降低,从而使土体在较小的峰值加速度输入下很容易进入非线性直至破坏。文献[7]和文献[8]中的研究显示了这一规律(图 4)。这表明土体在较低强度的地震波输入下很快进入非线性,使阻尼增大且响应降低,因此,在模型地基设计中应根据试验目

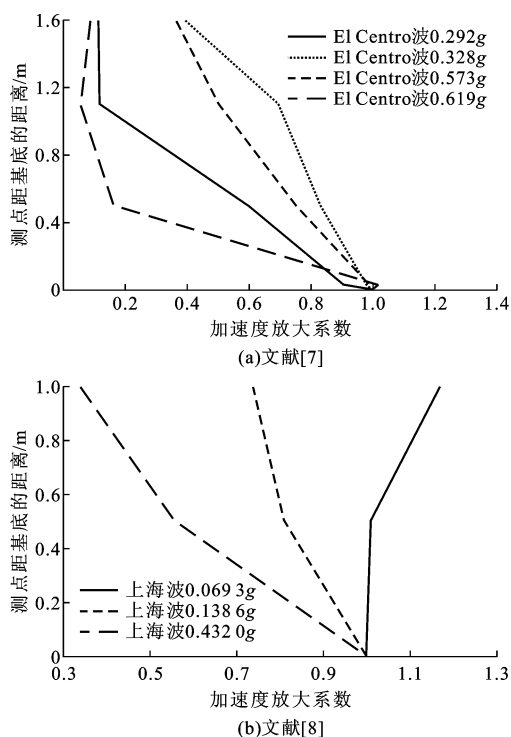


图4 含水量较大的土体加速度放大系数

Fig. 4 Acceleration Amplification Coefficients of Soil with Higher Moisture Content

的不同而严格控制含水量。

## 5 地震波的输入次数

随着振动次数的增加,一方面会使土体密实,这在干砂模型地基试验中表现突出,但对地基的动力特性影响不大。另一方面会引起土体非线性的不断发展,这种情况对模型地基土体动力特性影响较大,即导致地基自振频率的降低和阻尼的增大,这一现象在含水量较高的黏土中尤为突出。因此,在土-结构动力相互作用试验中,应优化加载制度以适当控制地震波的输入次数,确保试验结果的正确性。

此外,在仅有水平地震波激励的情况下,模型地基会产生明显的竖向加速度响应,文献[4]中的研究发现其响应峰值约为输入峰值的50%。这种现象在现有的文献中均未提及,关于这一现象对试验的影响有待进一步研究。

## 6 结语

(1)土-结构动力相互作用试验中,应先采用柔性土箱。在相同条件下,柔性土箱中土体的有效试验区域比刚性土箱大,从而使模型结构的几何缩尺不必太小,为提高试验精度提供了条件。但是,箱壁进行过柔性处理的刚性土箱也可用于对土体层状剪

切变形要求不高的试验研究。

(2)土箱自振频率应远离模型地基的自振频率。

(3)适当控制模型地基的高度。

(4)土体含水量对模型地基的动力响应影响明显,应根据试验目的和要求的不同,严格控制模型地基土中的含水量。

(5)地震波的输入次数对模型地基动力特性改变较大,应优化试验加载制度方案,在保证实现试验目的的前提下尽量减少地震波的输入次数。

(6)在仅有水平地震波输入时,应注意试验中可能产生的竖向加速度响应对试验结果的影响。

## 参考文献:

## References:

- [1] 沈祖炎,黄奎生,陈以一,等.大型火电厂主厂房钢支撑-框架结构振动台试验模型[J].建筑科学与工程学报,2006,23(4):1-5.  
SHEN Zu-yan, HUANG Kui-sheng, CHEN Yi-yi, et al. Shaking Table Test Model with Steel Braced-frame Structure About Main Plant of Large Thermal Power Plant[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 1-5.
- [2] 冯振宇,王忠民,樊丽俭.粘弹性点支承粘弹性桩的动力稳定性分析[J].中国公路学报,2006,19(1):67-70.  
FENG Zhen-yu, WANG Zhong-min, FAN Li-jian. Dynamic Stability Analysis of Visco-elastic Pile with Point Visco-elastic Supports[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 67-70.
- [3] 伍小平.砂土-桩-结构相互作用振动台试验研究[D].上海:同济大学,2002.  
WU Xiao-ping. Research of Shaking Table Test of Sandy Soil-pile-structure Interaction[D]. Shanghai: Tongji University, 2002.
- [4] KEIZO O, TOSHIO S, TADASHI K, et al. Substantial Cross Section Plastic Deformation of Underground Reinforced Concrete Structure During Strong Earthquakes[J]. Journal of JSCE, 2003, 62(1): 157-175.
- [5] 韦晓.桩-土-桥梁结构相互作用振动台试验与理论分析[D].上海:同济大学,1999.  
WEI Xiao. Research of Shaking Table Test of Soil-pile-bridge Interaction[D]. Shanghai: Tongji University, 1999.
- [6] 周林聪.地震作用下大跨度地下结构振动性态研究[D].南京:河海大学,2002.  
ZHOU Lin-cong. Research of Vibration Behavior for

- (12):129-134.
- [3] SONG P S, WU J C, WANG S H, et al. Statistical Analysis of Impact Strength and Strength Reliability of Steel-polypropylene Hybrid Fiber-reinforced Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(1): 1-9.
- [4] 高建明, 孙 伟. 钢纤维砼疲劳寿命分布规律的研究 [C]//李士恩, 杨朝礼. 全国第五届纤维水泥与纤维混凝土学术会议论文集. 广州: 广东科技出版社, 1994: 102-109.
- GAO Jian-ming, SUN Wei. Study on Distribution Regularity for Fatigue Life of Steel Fiber Reinforced Concrete [C]//LI Shi-en, YANG Chao-li. The 5th China Fiber Reinforced Concrete Academic Thesis Album. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1994: 102-109.
- [5] 孙晓燕, 黄承逵. 外贴纤维布加固超载后钢筋混凝土桥梁构件抗弯性能试验 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 82-87.
- SUN Xiao-yan, HUANG Cheng-kui. Test on Flexural Performance of RC Bridge Member After Overload Reinforced with Externally Bonded FRP [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 82-87.
- [6] 袁旭斌, 贺拴海, 宋一凡. 粘贴纤维布加固 RC 梁的受弯裂缝计算方法 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 54-58.
- YUAN Xu-bin, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan. Calculation Method on Bending Crack in RC Beams Strengthened with FRP [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 54-58.
- [7] 罗立峰. 钢纤维增强聚合物改性混凝土的冲击性能 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 71-76.
- LUO Li-feng. Steel Fiber Reinforced Polymer Modified Concrete Impact Behaviors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 71-76.
- [8] 薛伟辰, 王晓辉. 有黏结预应力 CFRP 筋混凝土梁试验及非线性分析 [J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 41-47.
- XUE Wei-chen, WANG Xiao-hui. Experiment and Nonlinear Analysis of Concrete Beams with Bonded Prestressing CFRP Tendons [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 41-47.
- [9] 邓宗才. 高性能合成纤维混凝土 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- DENG Zong-cai. High Performance Synthetic Fiber Reinforced Concrete [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- ~~~~~
- (上接第 53 页)
- Large-span Underground Structure Under Earthquake [D]. Nanjing: Hohai University, 2002.
- [7] 陈跃庆. 结构-地基动力相互作用体系振动台试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2001.
- CHEN Yue-qing. Shaking Table Testing on Dynamic Soil-structure Interaction System [D]. Shanghai: Tongji University, 2001.
- [8] 季倩倩. 地铁车站结构振动台模型试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2002.
- JI Qian-qian. Research of Shaking Table Test of Subway Station [D]. Shanghai: Tongji University, 2002.
- [9] 樱井彰雄. 地盘耐震学 [M]. 东京: 丸善出版社, 1999.
- SAKURAI A. Aseismic Ground Engineering [M]. Tokyo: Maruzen Publication, 1999.
- [10] 赵明华, 肖 燕, 陈昌富, 等. 考虑土体蠕变特性的桥台软基变形分析 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 56-61.
- ZHAO Ming-hua, XIAO Yan, CHEN Chang-fu, et al. Analysis of Deformation on Soft Subsoil Around Bridge Abutment Considering Soil Creep Property [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 56-61.
- [11] 沈蒲生, 方 辉, 夏心红, 等. 考虑施工过程和收缩徐变的框架结构简化分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(2): 41-45.
- SHEN Pu-sheng, FANG Hui, XIA Xin-hong, et al. Simplified Analysis for Frame Structure Considering Construction Process, Shrinkage and Creep [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 41-45.
- [12] 易伟建, 张 颖. 混凝土框架结构抗震设计的弯矩增大系数 [J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(2): 46-51.
- YI Wei-jian, ZHANG Ying. Moment Magnification Factor in Anti-seismic Design of Concrete Frame Structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 46-51.
- [13] FISHMAN K L, MANDER J B, RICHARDS R. Laboratory Study of Seismic Free-field Response of Sand [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1995, 14(1): 33-43.