

文章编号:1001-4888(2015)06-0797-05

## 简易振动台试验设备研制<sup>\*</sup>

张艳美<sup>1</sup>, 张鸿儒<sup>2</sup>, 洪世海<sup>2</sup>, 王震<sup>1</sup>, 黄春霞<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;  
3. 南京工业大学 交通学院, 江苏南京 210009)

**摘要:**为了完成多桩型复合地基抗液化性能振动台试验,利用实验室已有的反力墙和作动器,设计了一个小型的简易单向振动台系统和堆叠式剪切模型箱。堆叠式剪切模型箱内部尺寸为1200mm×800mm×772mm,由8层铝合金框架和7层橡胶条叠合而成。利用ANSYS有限元软件对模型箱及地基—模型箱进行了动力分析,并通过饱和粉细砂地基模型振动台试验验证了模型箱的效果。结果表明,所设计的模型箱能够较成功地模拟天然场地的边界条件,为多桩型复合地基抗液化性能振动台试验的顺利进行打下基础。

**关键词:**单向振动台;堆叠式剪切模型箱;地基模型;液化

中图分类号: TU443 文献标识码: A DOI: 10.7520/1001-4888-15-016

### 0 引言

碎石桩复合地基作为常用的抗液化加固措施已被广泛应用于实际工程中。但是,由于碎石桩的桩体强度取决于周围土体的约束作用,当实际地基土强度不高时,碎石桩复合地基的承载力有时难以满足工程要求,碎石桩抗液化的桩体效应也不显著。为了同时满足地基抗液化和承载力要求,近几年出现了多桩型复合地基加固可液化地基技术。同时,《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2012)也首次对多桩型复合地基进行了阐述。与单一类型桩复合地基抗液化相比,多桩型复合地基的抗液化作用机理更为复杂,尽管该方法已经在工程中得到应用,但是在其抗液化效果判别和设计等方面还存在一定困难。为了确保多桩型复合地基抗液化技术的安全可靠,对其进行深入的理论和试验研究显得尤为必要。

当前,研究地基液化问题所用的重要手段之一是振动台模型试验。为了研究多桩型复合地基的抗液化效果,本文利用北京交通大学实验室已有的反力墙和作动器,设计完成了一个简易单向振动台系统和堆叠式剪切模型箱,并通过数值模拟和饱和粉细砂地基模型试验验证了设计的合理性,为今后进行多桩型复合地基抗液化试验及类似振动台试验提供技术参考。

### 1 试验用模型箱设计

振动台试验是用有限的模型来模拟无限大的地层,因此,模型箱设计是否合理会直接影响振动台试验结果的可靠性。为了更精确地模拟地层的地震响应情况,要求试验时尽量减小模型箱边界带来的“模型箱效应”<sup>[1]</sup>。另外,模型箱还应具有足够的侧向刚度以约束土体的侧向变形,并能较准确地模拟土体在地震作用下的剪切变形,同时地基模型的动力响应尽量不受模型箱本身振动的影响。

\* 收稿日期: 2015-01-23; 修回日期: 2015-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208510, 51108235); 山东省研究生教育创新计划项目(SDYY15140), 石油大学(华东)研究生教改重点项目(YJ-A1408), 中国石油大学(华东)考试改革项目(KS-A201403)

通讯作者: 张艳美(1972—), 女, 副教授, 博士, 研究方向为土动力学及地基处理。Email: zhangym@upc.edu.cn

刚性模型箱、圆筒型模型箱和堆叠式剪切模型箱是当前国内外振动台试验常用的三种类型的模型箱,文献[2—6]已对这三类模型箱的优缺点进行了阐述。其中,剪切模型箱材料有钢框架和铝合金框架两种。北京交通大学实验室现有的大型叠式剪切模型箱采用钢框架,由黄春霞等<sup>[3]</sup>(2006年)自行研制并利用该模型箱进行了碎石桩复合地基抗液化性能试验;2009年,高博等<sup>[4]</sup>对该模型箱进行了改进,并利用改进的模型箱进行了碎石桩复合地基震后沉降规律试验。但是,在上述试验过程中发现,以上钢框架堆叠式剪切模型箱存在自重大、需设内衬来防止漏土漏水、难以操作等问题。由于多桩型复合地基抗液化试验也必须在不排水条件下进行,综合考虑本次试验的经费和目的等情况,重新设计了一个尺寸较小的铝合金框架模型箱。

### 1.1 模型箱设计方案

模型箱的内部尺寸为1200mm×800mm×772mm,由8层铝合金框架和7层橡胶条叠合而成。每层铝合金框架由4根100mm×44mm×3mm的矩形铝管连接而成,铝合金的密度为2700kg/m<sup>3</sup>,其弹性模量为70GPa,连接节点处采用角铝连接件从内部以铆钉固定,接缝处采用环氧树脂做防水处理。非主振方向的橡胶条尺寸为1200mm×15mm×60mm,振动方向的橡胶条尺寸为830mm×15mm×60mm。详细设计见图1,完成后的模型箱实物见图2。

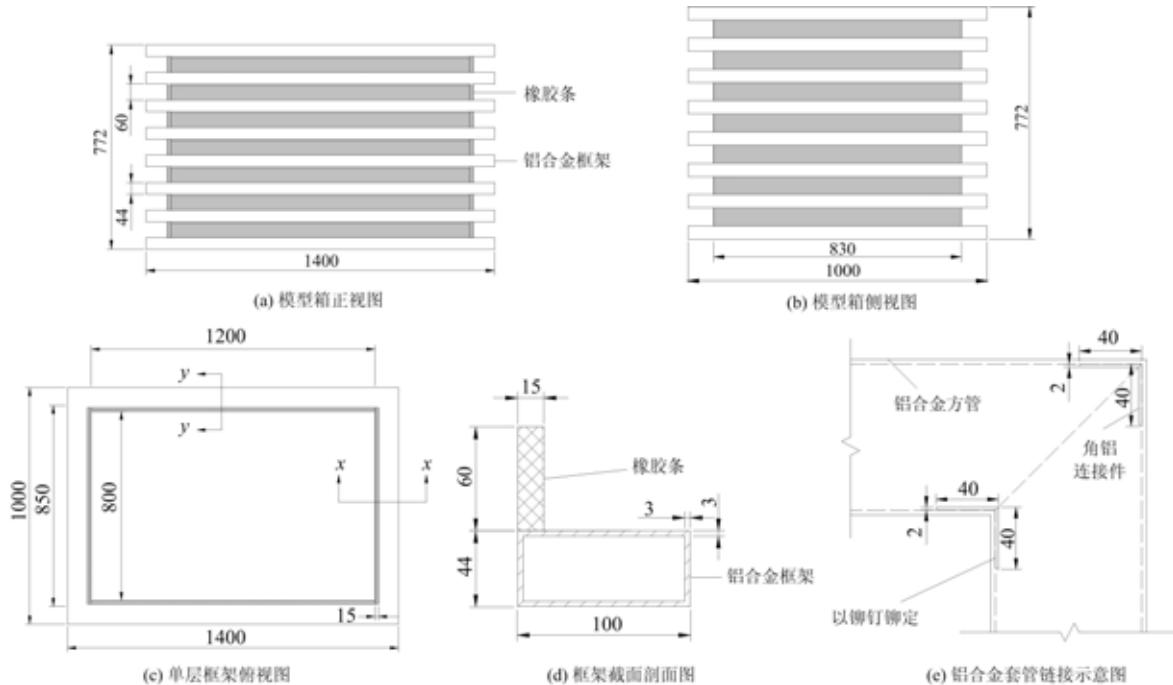


图1 堆叠式剪切模型箱设计方案

Fig. 1 Design scheme of laminar shear model box



图2 模型箱实物

Fig. 2 Real model box

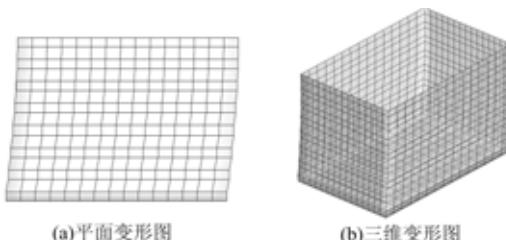


图3 模型箱一阶振型变形图

Fig. 3 Deformation figure of first mode of the shear model box

### 1.2 模型箱动力分析

由于橡胶的材料特性对试验结果影响较大,为了选择合适的橡胶材料,利用ANSYS有限元软件对

不同弹性模量橡胶的模型箱进行了数值模拟。模型箱的一阶振型变形图( $x$ 方向)如图3所示,模型箱的一阶自振频率与橡胶弹性模量关系见图4。采用实体单元,利用有限元软件计算得到地基的一阶自振频率为21.18Hz。通过对比,最后选用了邵氏硬度为30的天然橡胶。

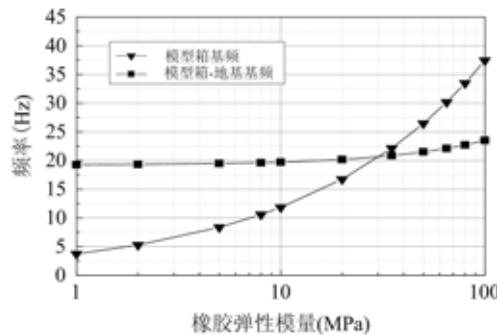


图4 模型箱一阶自振频率与橡胶模量的关系

Fig. 4 Relationship between the natural frequency of model box and the elastic modulus of rubber

## 2 简易单向振动台系统设计

为了与模型箱匹配,在参考实验室原有振动台的基础上,设计了一个小型的简易单向振动台。振动台采用1.7m×1.0m×0.74m的现浇钢筋混凝土基础,见图5。浇筑而成的混凝土基础约重3.2t,基础实物见图6。

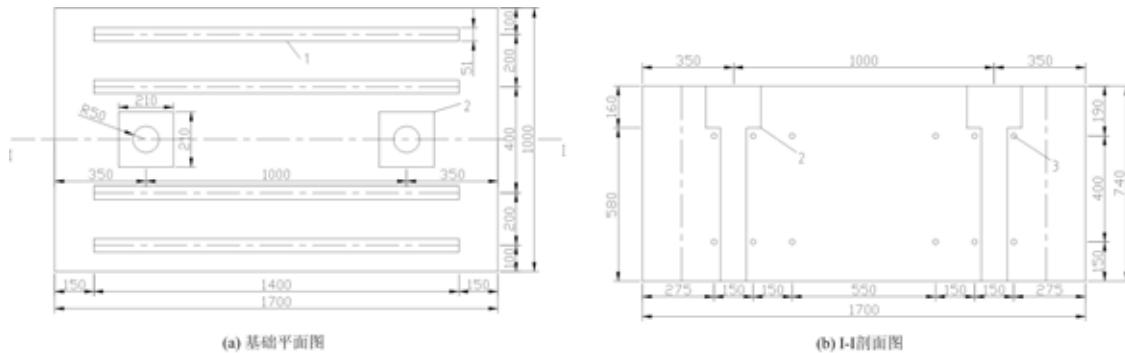


图5 混凝土基础设计图

Fig. 5 Design of concrete foundation

综合考虑适用性与经济性,选用钢板作为振动台台面,台面尺寸1.7m×1.0m×0.01m。试验时,利用环氧树脂系胶结剂将模型箱与振动台台面胶结成为一体。为了获得上部荷载作用下台面的挠度,笔者对台面钢板进行数值计算,得到上部荷载作用下钢板的最大变形值为0.12mm,最大拉应力为10.5MPa,满足要求。在台面中部焊有一块厚钢板,利用高强度螺栓将振动台台面与作动器连接在一起。为了消除作动器和台面连接板的制作误差,在台面的两侧各设置了2个轴承来限制台面的转动和侧移。另外,在模型箱两侧各设了两根立柱,并通过横梁连接,以保证振动过程模型箱只发生单向剪切变形,不发生侧向及平面扭转变形。

## 3 振动台试验验证

振动台试验设备设计制作完成后,首先进行了饱和粉细砂地基模型振动台试验以检验设计的合理性。试验采用BWMK型电阻应变式孔隙水压力传感器、YD36型电压输出型压电加速度传感器和StrainBook616动态数据采集系统。饱和粉细砂地基模型振动台试验时,各类传感器的布置情况如图7



图6 振动台基础

Fig. 6 Foundation of the  
shaking table

所示。试验时,输入正弦波,频率为4Hz,加速度峰值为0.15g。

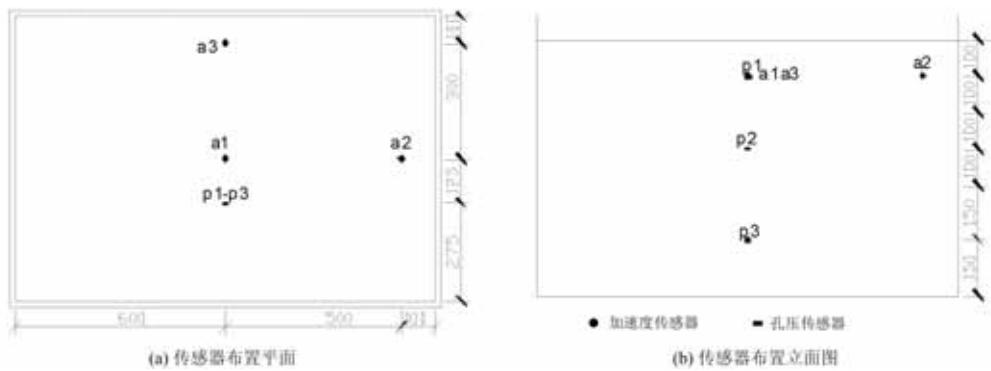


图7 传感器布置图

Fig. 7 Arrangements of sensors

图8反映出,对于饱和粉细砂地基模型,当输入正弦波时,a1、a2和a3点的加速度时程曲线基本相同,这一结果表明模型箱能够较成功地模拟天然地层的边界条件,模型箱边界对土体的影响相对较小。

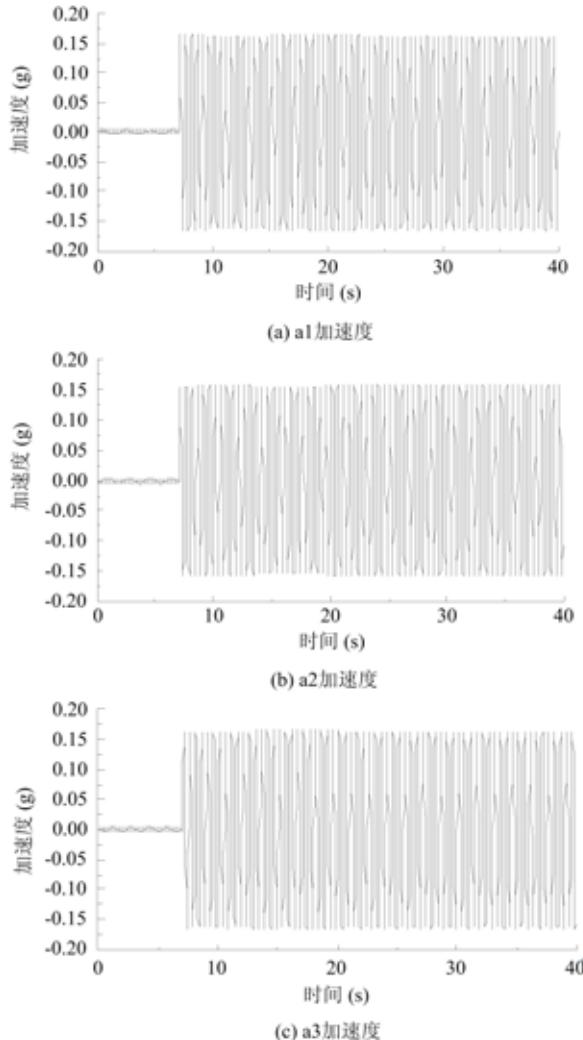


图8 a1、a2与a3加速度时程

Fig. 8 Accelerate time of position a1, a2 and a3

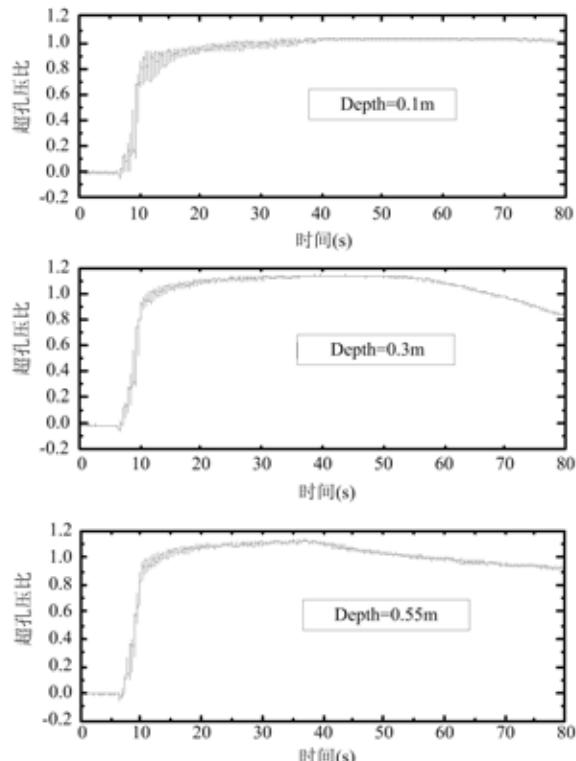


图9 不同深度处超孔压时程曲线

Fig. 9 Excess pore water pressure time in different depth

图9为正弦波作用下饱和粉细砂地基模型的超孔压比曲线。由图中曲线可以看出,对于饱和粉细

砂地基模型,在整个振动过程中,不同深度处的超孔压比都超过1.0,整个地基模型处于完全液化状态。振动期无孔压消散现象,振动结束后才开始消散。

#### 4 结论

由于获取工程现场地震期数据非常困难,振动台试验成为模拟工程结构地震响应的重要手段之一。本文针对多桩型复合地基抗液化性能试验研制了一个堆叠式剪切模型箱和单向简易振动台系统,并利用该试验装置进行了饱和粉细砂地基模型振动台试验。试验结果表明,所设计的模型箱纵向和横向边界条件对土体的影响较小,能够较成功地模拟天然地层的边界条件。

#### 参考文献:

- [1] 陈跃庆,吕西林,黄炜. 结构—地基相互作用振动台试验中土体边界条件的模拟方法[J]. 结构工程师, 2000(3): 25—30 (CHEN Yueqing, LV Xilin, HUANG Wei. Simulation method of soil boundary condition in shaking table tests of soil structure interaction[J]. Structural Engineers, 2000(3):25—30(in Chinese))
- [2] 伍小平,孙利民,胡世德等. 振动台试验用层状剪切变形土箱的研制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(7):781—785 (WU Xiaoping, SUN Limin, HU Shide, et al. Development of laminar shear box used in shaking table test[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2002, 30(7):781—785 (in Chinese))
- [3] 黄春霞,张鸿儒,隋志龙. 大型叠层剪切变形模型箱的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10):2128—2136 (HUANG Chunxia, ZHANG Hongru, SUI Zhilong. Development of large-scale laminar shear model box [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10):2128—2136 (in Chinese))
- [4] 高博,张鸿儒. 堆叠式剪切模型箱的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2):4021—4026 (GAO Bo, ZHANG Hongru. Improvement of stacked shear model box [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(supp. 2):4021—4026 (in Chinese))
- [5] 梁栋,蒋关鲁,刘先峰等. 大型堆叠式剪切模型箱的研制[J]. 铁道建筑, 2009(10):63—66 (LIANG Dong, JIANG Guanlu, LIU Xianfeng, et al. Development of a large stacked shear model box[J]. Railway Engineering, 2009(10):63—66(in Chinese))
- [6] Taylor C A, Crewe A J. Shaking table tests of simple direct foundation[C]//In: Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco: Elsevier Science Ltd., 1996:2048—2056.

## Development of Simple Shaking Table Experiment Equipment

ZHANG Yan-mei<sup>1</sup>, ZHANG Hong-ru<sup>2</sup>, HONG Shi-hai<sup>2</sup>, WANG Zhen<sup>1</sup>, HUANG Chun-xia<sup>3</sup>

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China; 2. School of Civil Engineering Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Traffic Institute, Nanjing Industrial University, Nanjing 210009, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to complete shaking table experiment of multi-pile composite foundation liquefaction resistance, using existing reaction wall and actuator in laboratory, a small simple and easy unidirectional shaking table system and laminar shear model box were developed. The internal dimensions of laminar shear model box are 1200mm in length, 800mm in width and 772mm in height, and it is made of 8 layers of aluminum alloy frame and 7 layers of rubber strip. Dynamic analysis of model box and foundation-model box was carried respectively by using finite element software ANSYS. The effect of model box was verified based on shaking table experiment of saturated silt sand foundation model. Experimental results show that designed model box can successfully simulate natural site boundary conditions and ensure that shaking table experiment of multi-pile composite foundation liquefaction resistance can be carried out smoothly.

**Keywords:** unidirectional shaking table; laminar shear model box; foundation model; liquefaction