

DOI: 10.11779/CJGE2017S2060

# 双向叠层剪切箱的研制及模型土体振动台试验研究

曹文冉<sup>1, 2</sup>, 田伟<sup>1, 2</sup>, 李春<sup>1, 2</sup>

(1. 中国石油集团工程技术研究院, 天津 300451; 2. 中国石油天然气集团公司海洋工程重点实验室, 天津 300451)

**摘要:** 在结构-土体动力相互作用试验中, 最常用的盛土容器是叠层剪切箱。在总结国内外剪切箱经验的基础上, 研制出了刚度可调的二维叠层剪切箱, 改进了箱体层间滑动装置。通过地震激励下模型土体试验, 验证了该剪切箱很好的解决了单向水平地震输入时的边界效应, 研究了土体在地震作用下的位移变化形态和非线性特征, 得到了土体剪应力随地震动峰值的变化规律。结果表明: 不同高度处土体的位移分布接近第一振型, 土体剪应力和剪应力-剪应变滞回曲线的包络面积都随着地震动峰值的增大而增加, 但是上下部土体的剪应力增加速率存在明显不同。

**关键词:** 叠层剪切箱; 振动台试验; 边界效应; 剪应力时程; 滞回曲线

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S2-0249-05

**作者简介:** 曹文冉(1984-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋平台和海底管道研究工作。E-mail: caowenran@163.com。

## Development of 2-D laminar shear box and shaking table tests on model soil

CAO Wen-ran<sup>1, 2</sup>, TIAN Wei<sup>1, 2</sup>, LI Chun<sup>1, 2</sup>

(1. CNPC Research Institute of Engineering Technology, Tianjin 300451, China; 2. CNPC Key Laboratory of Offshore Engineering, Tianjin 300451, China)

**Abstract:** The laminar shear box is the most commonly used soil container in shaking table tests for soil-structure dynamic interaction. On the basis of the development experience of the worldwide shear boxes, the two-dimensional laminar shear box with adjustable stiffness is developed, and the interlayered sliding device is improved. Through the shaking table tests on model soil under earthquake, the boundary effect of shear box can be eliminated when the seismic load is applied to only one horizontal direction. The mode of vibration and nonlinear behaviors of soil are studied, and the relationship between soil shear stress and seismic peak is presented. The test results show that the distribution of displacements at different heights of soil is close to the first mode of vibration, and the shear stress of soil and the envelope area of shear stress-strain hysteretic loop increases with the increase of seismic peak, but the increase rate of shear stress at the top and bottom of soil is obviously different.

**Key words:** laminar shear box; shaking table test; boundary effect; time history of shear stress; hysteretic loop

## 0 引言

在结构-土体相互作用试验中, 必须设计一个容器来盛放土体, 以使土体保持一定的形状<sup>[1]</sup>。由于原型土在地震作用下近似做剪切变形, 这就要求土箱能够正确模拟土体的边界条件和剪切变形<sup>[2]</sup>。事实上, 在动力试验中, 土箱边界对土体变形的限制以及波的发射和散射都会对试验结果产生较大影响, 即存在“模型箱效应”<sup>[3]</sup>, 加之土体材料和地震波在土中传播的复杂性, 要完全模拟土体边界条件是很困难的, 因此如何减小土箱边界的波动反射就成了试验关键。

振动台试验中常用的土箱大致有3种: 刚性土箱、柔性土箱和剪切型土箱。由于刚性土箱和柔性土箱对试验结果影响很大, 因此剪切型土箱的应用较为广泛, 一般由10~20层矩形平面钢框架叠合而成, 层间设置

滚动装置, 相邻层可以相对滑动以模拟土体的剪切变形<sup>[4-6]</sup>。目前, 多数叠层剪切箱通过滚柱或滚珠来实现层间滑动, 前者滚柱容易滑出槽外导致层间发生偏移; 后者对滚珠的制造精度要求较高使得制造成本很高。可见, 上述两者都存在一定的局限性。

在总结国内外剪切型土箱经验的基础上, 本文自主设计制作一种叠层剪切箱, 改进层间滑动装置, 使其具有刚度可调、机构简单、安装方便等特点, 可以进行一维或二维振动台试验, 并通过地震波激励下模型土体试验验证该剪切箱在单向水平地震作用下的边界效应, 同时研究土体的剪应力-剪应变特性。

基金项目: 中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目 (2016A-1004)

收稿日期: 2017-08-02

## 1 模型箱的设计和制作

### 1.1 设计方案

结合哈尔滨工业大学结构与抗震试验中心大型振动台的几何尺寸和承载能力,本文自主设计并制作的叠层剪切箱主体尺寸为2.10 m(长)×1.60 m(宽)×1.57 m(高),采用13层框架叠合而成,每层框架高100 mm,由4根方形钢管(100 mm×3 mm)焊接而成,相邻两层框架之间由滑动装置支撑,通过层间定向相对滑移以满足模型地基水平层状变形要求(见图1)。

在垂直于振动方向的每个横向侧面,设计有3块尺寸相同(1.57 m×0.44 m)的钢板,采用螺栓固定的方式,以便根据试验要求选择需要使用的钢板数量,既提高了钢板使用的灵活性,又满足了改变箱体刚度的要求。剪切箱纵向两侧分别安装2根圆形立柱,每根立柱等距安装12个轴承,柱底与箱体底座焊接,柱顶通过方形钢管与另一侧立柱连接,以限制箱体的垂直运动和平面扭转运动。此外,剪切箱内壁衬有3 mm厚橡胶垫(过薄易从层间挤出,过厚会影响层间滑移,宜为2~3 mm)以防止水和土从间隙漏出。



图1 叠层剪切箱侧面

Fig. 1 Side of laminar shear box

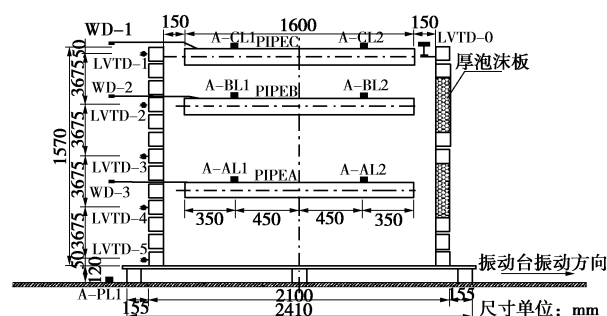
### 1.2 动力性能

采用扫频方法测试了箱侧不带钢板时空箱和满箱的基频,测得值分别为1.25 Hz和3.66 Hz。应用ABAQUS软件建立了三维有限元模型并进行了振型分析,采用实体单元模拟方形钢管,层与层之间通过钢板垫相连并可以自由滑动;土体采用莫尔-库仑模型,底边采用固定边界条件,侧边采用自由场边界条件,计算值分别为1.25 Hz和3.72 Hz。可见,两者数值基本一致,相互证明了结果的可靠性。根据自由振动衰减法获得剪切箱的阻尼比为2.13%。由于地震作用下土体的阻尼比为5%~25%,因此该剪切箱的阻尼不会给模型土体的地震反应带来不良影响。

## 2 模型箱边界效应分析

试验采用哈尔滨市松花江含细粒土砂作为模型土

体,土层厚1.5 m,分层填土夯实。箱内水平向布置加速度计以监测各层土体在地震波输入方向的模型箱效应,沿竖向布置加速度计以监测各层土体振动沿竖向的变化发展情况。箱外在底板布置加速度计以监测输入波在振动台面上的变化,沿竖向布置拉线位移计以监测各层土体的水平位移(见图2)。



注: LVT-位移计; WD-拉线位移计; A-加速度计; AL/BL/CL-钢管A/B/C

图2 试验传感器布置图

Fig. 2 Arrangement of test sensors

试验前,采用白噪声激振振动台台面使土体密实,然后选取El Centro波进行试验。试验完毕,取加速度计A-BL1、A-BL2(或A-CL1、A-CL2)记录峰值分别除以同层A-BL1(或A-CL1)记录峰值,得到轴向激励下的加速度放大系数,如图3所示。

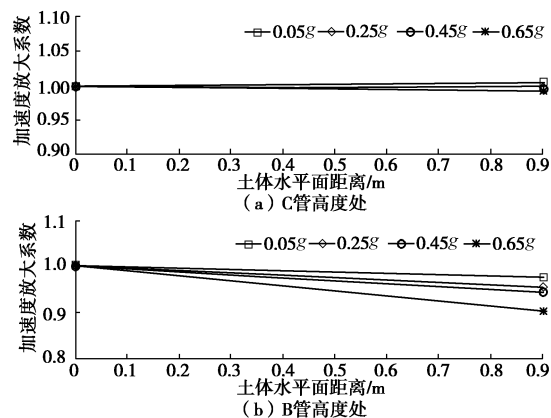


图3 轴向输入下模型箱效应

Fig. 3 Shear box effect in longitudinal input

可以看到,相同高度不同位置处的加速度放大系数在0.90~1.02之间,误差范围在10%以内,因此,剪切箱在轴向可以较好的消除边界效应,满足试验要求。具体的说,当埋深较浅时,加速度放大系数的变化接近于一条水平直线,说明模型箱效应可以忽略;随着埋深的增大,模型箱效应略有放大,但是在可接受的范围内。此外,随着地震动峰值的增大,模型箱效应略有增强。峰值较小时,输入能量较小,波传播到箱体边界时的反射能量也小,因此模型箱效应不大;当峰值较大时,输入能量增大,箱体边界反射波的能量增加,模型箱效应也随之增大。

利用竖向各层加速度 (A-AL1、A-BL1、A-CL1) 均方值除以台面加速度 (A-PL1) 均方根值, 可以得到轴向激励下各层加速度相对台面加速度的放大系数, 如图 4 所示。可见, 轴向激励时, 放大系数随着振幅增大而逐渐减小。在小振幅输入下, 放大系数均大于 1, 而在中等振幅和大振幅输入下, 放大系数自下而上先减小再增大。这说明土体在弹性阶段对地震波具有放大作用; 随着激励能量的增大, 土体开始出现非线性, 阻尼随之增大, 但由于土体的隔震作用, 土体传递振动能量逐渐减弱, 使能量无法向上传递, 从而导致放大系数减小。在大振幅输入下, 土箱下部刚度较大限制了土体的层状变形, 但是这种限制随着高度的增加而减弱, 因此放大系数又逐渐增大。

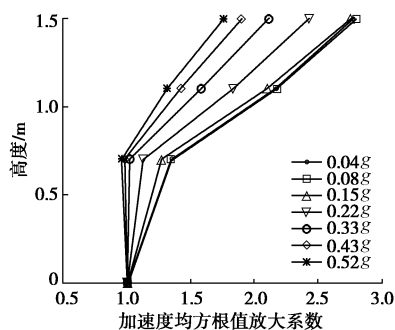


图 4 加速度均方值放大系数

Fig. 4 Amplification factor of mean square value of acceleration

### 3 模型土体振动台试验分析

#### 3.1 加速度时程与傅氏谱分析

图 5, 6 分别给出了输入峰值 0.05g 和 0.52g 时不同高度处的加速度时程及傅氏谱。

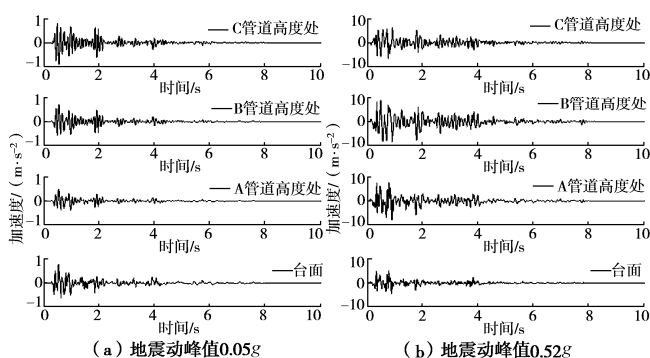


图 5 不同高度处的加速度时程

Fig. 5 Acceleration histories at different heights

可以看到, 不同峰值作用下, 土体的加速度反应沿高度增大。大震时的土体加速度反应增幅要小于小震, 说明小震时土体对地震波有放大作用, 而大震时由于部分土体已经进入塑性, 从而使放大作用有所减弱, 进而起到了一定的减震作用。

由此发现, 从振动台台面至模型土表面, 加速度频谱从多峰值逐渐变为少峰值, 即台面的加速度频率成分更为丰富; 随着土体高度的增加, 频率成分逐渐减少, 说明土体对加速度有滤波效果。另外, 与较小峰值相比, 较大峰值作用下的台面处频谱成分更为丰富, 频谱中低频幅值和高频成分有所增加。一方面, 在地震波自下而上的传递过程中, 加速度信号中的高频成分衰减更加明显, 传至顶部时高频成分与卓越频率成分的比值已经大幅减小, 说明土体材料阻尼的存在能吸收一部分振动波能量; 另一方面, 低频成分在向上传递的过程中出现了先增大后减小的情况, 表明土体会对地震波某些范围内的频率成分加以放大, 这是由于部分土体已经进入塑性状态, 土体刚度变小, 卓越周期变长导致的。因此, 在大震情况下, 土地地震反应分析需要考虑非线性影响。

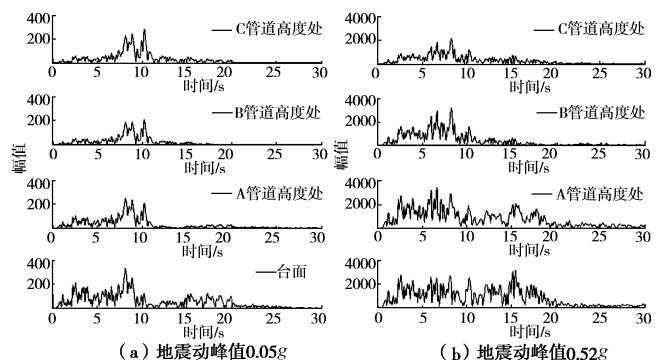


图 6 不同高度处的傅里叶变换

Fig. 6 Fourier transforms at different heights

#### 3.2 水平位移分析

为了实时呈现土体在地震波传递中某时刻的真实位移形态, 本文选取了每级输入工况下最上层土体位移达到最大时刻时不同高度处的土体水平位移分布。图 7 给出了位移计 LVDT-1 出现最大绝对位移时对应的竖向各测点相对台面的位移分布。可以看出, 当表层土体位移最大时, 不同高度处的位移分布接近第一阶振型。随着地震动峰值的增大, 箱体的整体绝对位移也在增大, 同时在距台面 0.37 m 高度处出现了反弯点, 该点以上位移分布渐趋一致。原因在于, 当地震动峰值增大到一定程度后, 部分下部土体出现塑性, 土层间颗粒的滑移使得层间抗剪能力降低, 从而导致该处层间位移增大。

#### 3.3 剪应力时程分析

为了获得土体剪应力传递随地震动峰值的变化规律, 图 8 给出了 El Centro 波作用下模型土体剪应力时程的均方根值和高度之间的关系。可以发现, 轴向激励下, 剪应力均方值曲线随地震动峰值的增大而逐渐右移; 当地震动峰值较小时, 土体基本处于线性状态,

剪应力均方根值自上而下依次增大;随着输入峰值的增大,剪应力均方根值曲线的非线性特征加强,土体上部层间剪应力的增长加速,而下部土体层间剪应力增长不明显,说明上部土体颗粒间的破坏逐渐加剧。因此,箱内上下两部分土体的剪应力增加速率是不同的,上部土体的剪应力增长快但总体幅度不大,而下部土体的剪应力增长慢但总体幅度明显要大。

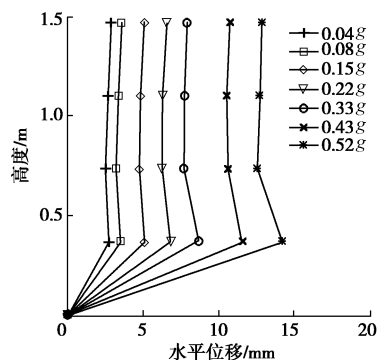


图7 模型土体水平位移情况

Fig. 7 Horizontal displacements of model soil

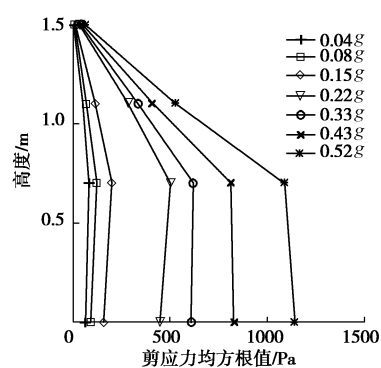
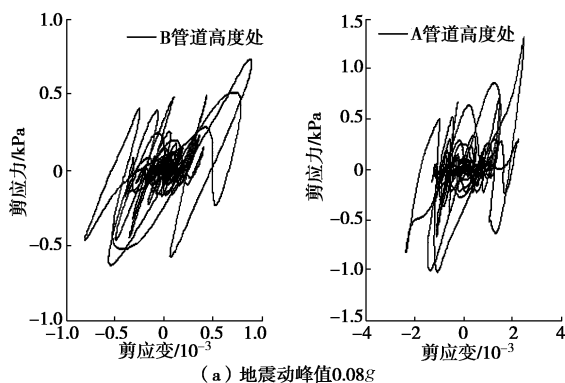


图8 剪应力均方值分布

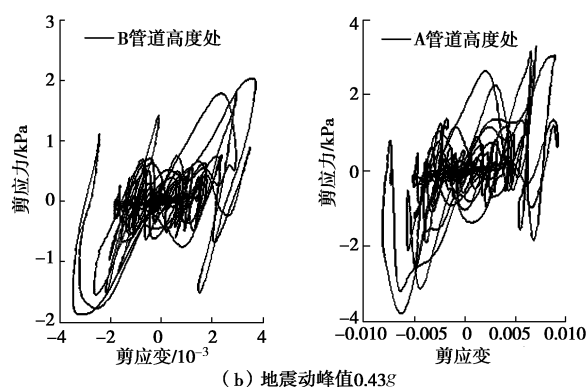
Fig. 8 Distribution of mean square value of shear stress

### 3.4 剪应力-剪应变特性

一般情况下,土体在地震时的剪应力-剪应变关系可以表现出非线性、滞后性、变形累积性等方面的特征。图9给出了地震动峰值为0.08g和0.43g下不同高度处土体的剪应力-剪应变滞回曲线。



(a) 地震动峰值0.08g



(b) 地震动峰值0.43g

图9 模型土体剪应力-剪应变图

Fig. 9 Shear stress-strain of model soil

对比发现,当地震动峰值为0.08g时,B管处土体的最大剪应变值约为0.09%,而A管处土体的最大剪应变值约为0.22%,相应的剪应力峰值分别为0.71 kPa和1.36 kPa。当地震动峰值增至0.43g时,B管处土体的最大剪应变值达到0.37%,A管处土体的最大剪应变值约为0.82%,相应的剪应力峰值分别为2.05 kPa和3.24 kPa。从剪应力与剪应变增量的比值得出,此时土体的非线性已经显现,剪应力-剪应变滞回曲线的包络面积逐渐增大,能量耗散也随之增强,而且随着地震动峰值的进一步提高,剪应变迅速扩大并超过1.30%,此时土体的非线性特征进一步增强。

## 4 结论与建议

本文采用深沟球轴承改进了层间滑动装置,设计制作了刚度可调的二维叠层剪切箱(相关技术共申报专利6件,目前已授权3件),同时应用该剪切箱进行了地震激励下模型土体试验,研究了土体在地震作用下的非线性特征,得到了土体剪应力随地震动峰值的变化规律。主要得到了以下结论:

(1) 在轴向激励时,土体竖向各层加速度相对台面加速度的放大系数随振幅的增大而减小,相同高度不同位置处的加速度放大系数范围均在10%以内,因此,本剪切箱较好的解决了单向水平地震输入试验时的模型箱边界效应,满足试验要求。

(2) 当表层土体位移最大时,不同高度处土体的位移分布接近第一振型。另外,小震时土体对地震波有放大作用,大震时土体却具有一定的减震作用,并且土体对加速度有滤波效果。因此,在大震情况下,土体地震反应分析需要考虑非线性。

(3) 在地震作用下,不同高度处土体的剪应力增加速率明显不同,即与上部相比,下部的剪应力增长较慢但总体幅度较大。随着地震动峰值的增大,土体的剪应力逐步提高,剪应力-剪应变滞回曲线的包

络面积逐渐增大, 能量耗散也随之增强。

### 参考文献:

- [1] 李振宝, 李晓亮, 唐贞云, 等. 土-结构动力相互作用的振动台试验研究综述[J]. 震灾防御技术, 2010, **5**(4): 439 - 450. (LI Zhen-bao, LI Xiao-liang, TANG Zhen-yun, et al. Review of research on shaking table test of dynamic soil-structure interaction[J]. Technology for Earthquake Disaster Preventio, 2010, **5**(4): 439 - 450. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] MATSUDA T, GOTO Y. Studies on experimental technique of shaking table test for geotechnical problem[C]// Proceedings of 9th World Conference Earthquake Engineering. Tokyo, 1989.
- [4] 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 Xiao-ping, SUN Li-min, HU Shi-de, 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))
- [5] 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 - 2134. (HUANG Chun-xia, ZHANG Hong-ru, SUI Zhi-long. Development of large-scale laminar shear model box[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(10): 2128 - 2134. (in Chinese))
- [6] 陈国兴, 王志华, 左熹, 等. 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 - 98. (CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua, ZUO Xi, et al. Development of laminar shear soil container for shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 89 - 98. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)