

堆叠式剪切模型箱的改进

高 博, 张鸿儒

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 对现有叠层剪切模型箱进行技术改进, 其整体改进思路是用轴承和端部弹性约束系统分别取代常见的滚珠和侧向刚性约束系统。改进措施是把原叠层方钢框架模型箱改成 H 型钢和方钢交替堆叠式模型箱; 层间轴承外径由 16 mm 调整为 72 mm; 模型箱受力形式由“抽屉式”改为“堆叠式”; 非主振方向上铆接弹性薄钢板取代侧向刚性约束系统。并用 ANSYS 软件对铆接弹性薄钢板情况进行模拟, 结果显示, 其对模型箱和土体的动力特性影响很小。改进后的模型箱自重减小, 层间间隙缩小并且可根据需要调整, 模型箱受力机制更接近于实际土体。设备的可循环操作性和使用性能增强, 可最大程度地利用现有的试验设备实现土体在动荷载作用下的自由剪切变形模拟。

关键词: 土力学; 振动台试验; 叠层剪切模型箱; 改进

中图分类号: TU 411.93

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 2 - 4021 - 06

IMPROVEMENT OF STACKED SHEAR MODEL BOX

GAO Bo, ZHANG Hongru

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Technical improvement has been made to existing laminar shear model box. The main idea of the technical improvement is using shafting bearing and the rigid restriction system in one side to replace ball bearing and lateral rigidity restriction system which are normally used respectively. The way of the technical improvement is changing laminar square steel frame into the one with H-formed steel and square steel stacking alternately. External diameter of the interlaminar shafting bearing has been changed from 16 mm to 72 mm, the force mechanism of the model box has been changed from “drawer” to “stack”, and the lateral rigidity restriction system has been replaced by riveted elastic thin steel plate in non-main vibration direction. The software ANSYS has been used to verify the effect of the riveted elastic thin steel plate on the dynamic characters of model box and soil. It is shown that there is a little effect on model box riveted by thin steel plate. After improvement the deadweight of the model box decreases, the interlaminar spacing is smaller than before and also can be adjusted to the needed sizes, and the force mechanism of the model box is more close to the actual one of soil. Equipment can be reused, and its operation capability is better than before. By using the improved test equipment, it can be achieved to simulate the soil performance under dynamic load.

Key words: soil mechanics; shaking table test; laminar shear model box; improvement

1 引 言

目前, 常用的模型土箱大致有刚性模型箱、圆

筒型模型箱和叠层剪切模型箱 3 种^[1]。叠层剪切模型箱在模拟土体剪切变形方面优于其他 2 种, 其采用刚性框架, 对土体能提供较好的约束力, 土体不会对外膨胀。鉴于此, 黄春霞^[2]利用自制的叠层剪

收稿日期: 2008 - 10 - 22; **修回日期:** 2009 - 03 - 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678019)

作者简介: 高 博(1980 -), 男, 2003 年毕业于河北工程大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事土动力学试验方面的研究工作。E-mail: efgaobo@163.com

切模型箱和简易单向振动台进行了碎石桩复合地基大型振动台模型试验,探讨了碎石桩复合地基的液化性能,并取得了一定的研究成果。

叠层剪切模型箱由矩形平面钢框架由下而上叠合制成,层间放置轴承使各层框架之间可以相对自由滑动,以模拟土体在动荷载作用下的剪切变形(见图1)。国内外有关岩土工程的振动台模型试验^[3~11]多采用这种模型箱来完成,其统计情况如表1所示。

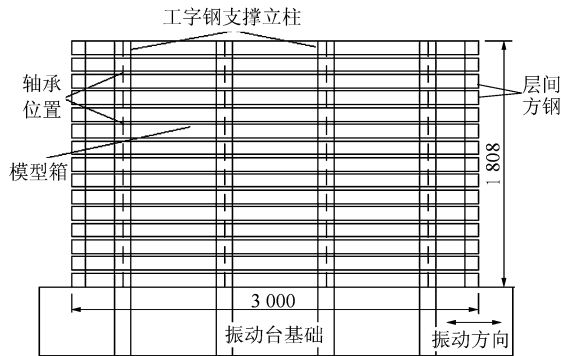


图1 叠层剪切模型箱及振动台正视图(单位: mm)
Fig.1 Front view of laminar model box and shaking table (unit: mm)

表1 现有典型模型箱统计^[3~11]

Table 1 Statistics of existing typical model boxes^[3~11]

研制者	年份/年	宽×长×高/(mm×mm×mm)	模型箱型式
范立础	2002	700×3 200×3 600	刚性模型箱
凌贤长	2005	1 500×2 000×2 000	层状剪切钢容器
蒋关鲁	2006	1 500×4 000×2 500	堆叠式剪切模型箱
陈国兴	2007	3 000×4 500×1 800	堆叠式剪切模型箱
A. D. Gibson	1997	350×900×470	单向矩形堆叠式剪切模型箱
S. K. Prasad	2004	500×1 000×1 000	单向矩形堆叠式剪切模型箱
T. S. Ueng	2006	254×457×254	双向矩形剪切模型箱
A. Pamuk	2007	355×710×355	单向矩形刚性模型箱
D. Pitilakis	2008	550×1 190×814	单向矩形堆叠式剪切模型箱

试验过程中发现,这些自制设备存在一些不完善之处,不仅干扰了试验数据精度,也降低了试验设备的循环可操作性,为后续研究工作带来了一些不便。

在广泛调查和研究国内外已完成的相关振动台模型箱技术^[5, 12~14]基础上,本文对现有的模型箱设备进行了技术上的改进,以期待提高试验精度,使模型箱的设计更趋于合理,更好地模拟土体实际受力状态,并使设备可重复使用,为今后开展此类相关振动台试验工作提供技术性参考。

叠层剪切变形模型箱研制的关键性问题就是层和层之间的连接方式与模型箱的外围约束问题。一般的处理方法都是采用滚珠和侧向刚性约束。本文对此进行了针对性研究,认为从机械设计角度讲,采用轴承和端部弹性约束系统,其机械性能要优于滚珠和侧向刚性约束系统。

2 叠层模型箱需改进之处

现有的大部分叠层模型箱都有相似之处和细微差别,本文只针对黄春霞^[2]研究所用模型箱进行改进,其改进思路可以为其他后续模型箱的研制开发提供技术参考。

原模型箱由15层独立的方形钢框架由下至上叠合而成,各层钢框架通过支撑立柱上的轴承来获得支撑,模型箱各层可以相对自由滑动,以模拟土的剪切变形。框架层间间隙为22 mm,容器外框尺寸为:长3.2 m,宽1.7 m,高1.9 m。每层钢框架采用自重小、截面惯性矩大、断面为100 mm×100 mm×3 mm的方钢管焊接而成^[2]。

2.1 轴承系统强度问题

(1) 每根方钢的质量为88.55 kg,分别由支撑立柱上的层间8个轴承共同承担。22 mm的框架层间间隙限定了支撑立柱上的轴承尺寸。轴承的外径为16 mm,理论上每个轴承要承担11.07 kg的质量。但由于立柱和方钢制作安装误差,层间的8个轴承和层间方钢都很难控制在同一水平面上,所以轴承的实际承载力要达到29.52 kg才能完全满足要求。

(2) 由于轴承杆的长度不足(见图2),使轴承位于方形钢管角点圆弧处附近,轴承和方钢没有形成

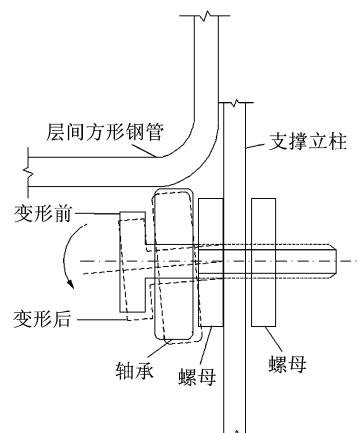


图2 轴承受力后变形立面图
Fig.2 Elevation view of shafting bearing deformation under load

面与面的接触。这也是一定程度上增大了轴承的压力, 影响其正常转动。如果加长轴承杆又会使轴承杆根部弯矩加大, 使轴承杆产生过大变形。轴承系统的整体承载力不足, 使轴承受力后变形, 如图 2 所示。

轴承系统是否正常工作是整个设备正常运转的关键。轴承在超负荷状态下工作, 使得部分层间轴承失效, 导致模型箱的剪切变形情况如图 3 所示, 没有产生如图 4 所示的理想剪切变形情况。

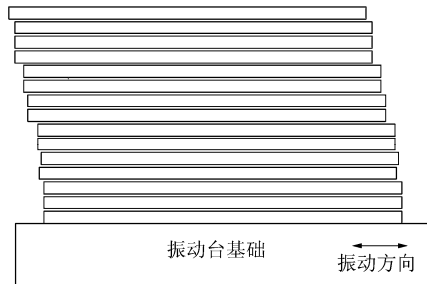


图 3 振动过程中模型箱实际剪切变形情况

Fig.3 Actual shear deformation of model box during vibration process

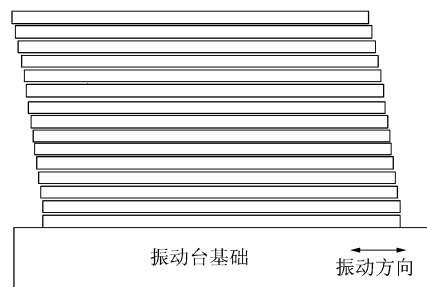


图 4 振动过程中模型箱理想剪切变形情况

Fig.4 Ideal shear deformation of model box during vibration process

2.2 框架侧向摩擦问题

模型箱框架如果因土压力作用产生侧向鼓胀变形会增大支撑限位系统对箱体框架的摩擦阻力, 影响模型箱试验的数据采集。

(1) 最下层框架受土压力的影响, 沿非主振方向上的侧向膨胀变形值最大, 经计算为 1.2 mm(见图 5); 而且, 土体的变形属于剪切变形, 其下部相对剪切位移最大。这样由于土压力作用, 使水平剪切变形最大的底层框架受到了最大的摩擦阻力。而且由于土压力沿深度的变化, 使得侧向约束系统对模型箱各个层间框架受到不同的约束力, 这很大程度上影响了模型箱框架的动力特性。

(2) 由于振动台制作和安装误差, 作动器的力作用线不通过台面结构的质心, 或台面上的土样质

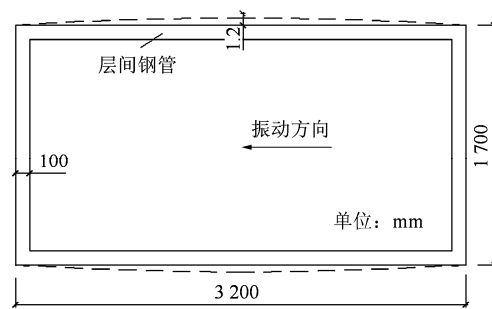


图 5 土压力作用下框架最底层非主振方向上的膨胀变形
Fig.5 Swell deformation of bottom frame of model box in non-main vibration direction under soil pressure

心和台面中心不重合, 在惯性力作用下, 台面和模型箱框架会产生转动和侧向运动, 这也使得侧向约束系统对框架产生了较大的摩擦阻力。

2.3 框架剪切变形问题

框架层间虽然能自由滑动产生剪切变形, 但其受力状态并不像实际土体一样堆叠而成, 而是各个方钢分别由立柱的轴承支撑, 即“抽屉式”的自由滑动。框架只起到了约束作用而没有起到模拟土体边界的作用, 这与土体的实际受力情况相差较远。如果采用堆叠式的叠层模型箱, 小型号的轴承又很难承担框架方钢的质量; 大型号轴承又会使框架层间间隙过大。

2.4 模型箱改进后需达到的要求

(1) 结构系统牢固, 以免箱体在激振过程中发生失稳破坏。

(2) 既要考虑试验的合理性和可操作性, 又要考虑模型箱改进后与现有已成型的试验设备匹配。

(3) 在尺寸一定的条件下, 尽可能减小现有模型箱的自重。使同体积模型箱的密度接近于土体的密度, 减小模型箱与土体在振动过程中的耦合效应。

(4) 减小质量的同时, 层间方钢又要提供足够的侧向刚度。提高层间方钢侧向刚度不仅是为了提供土体边界的侧向约束, 也为了减小方钢的侧向变形, 减小侧向摩擦阻力。

3 模型箱的改进

3.1 改进思路

基于节 2 中提出的问题和需要达到的预期要求, 本文对现有模型箱进行了如下改进。

轴承和端部弹性约束系统从机械角度讲要好于滚珠和侧向刚性约束。滚珠系统无方向性，不容易固定，不易拆装，费用大、承载力低。采用轴承系统后。遇到的核心问题是：大尺寸轴承虽能满足承载力要求，但会增加层间间隙，导致层间土体向外鼓胀；小尺寸轴承又很难承受方钢质量；端部弹性约束系统遇到的问题是很难通过试验数据得到其对系统动力特性的影响。伍小平等^[1, 15]已对制作模型箱的各种材料进行了对比分析，考虑到对现有模型箱的利用，故仍采用钢框架材料进行制作。

3.2 改进措施和优点

(1) 把现有的“抽屉式”悬挂叠层剪切模型箱改为受力更加合理的“堆叠式”叠层剪切模型箱。模型箱利用 H 型钢和方钢交替堆叠的方式(见图 6)，并在 H 型钢腹板的上下各安置轴承的方式代替了原有的全方钢框架模型箱，实现层间框架的自由滑动，如图 7 所示。

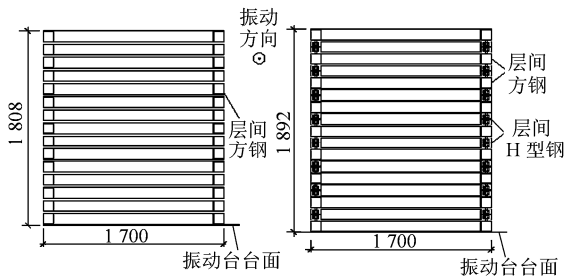
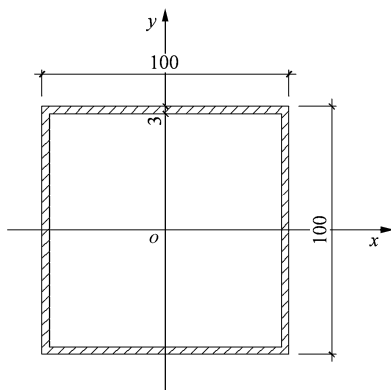


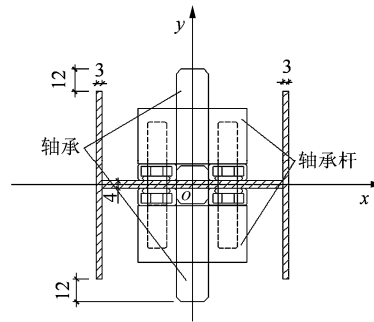
图 6 改进前后模型箱剖面图(单位: mm)

Fig.6 Cross-sections of model box before and after improvement (unit: mm)

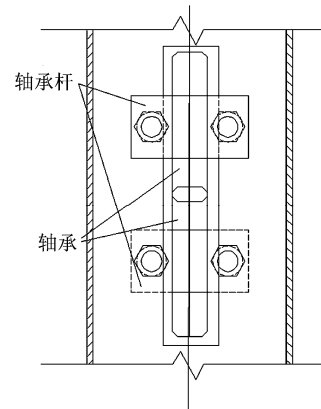
改进后，H 型钢比方钢的质量轻(见表 2)，模型箱自重的降低减小了层间框架与土体之间由于惯性力作用而产生的相互作用力。并且采用 H 型钢来代替层间方钢的设计方案能很好地解决轴承与层间间隙的矛盾。该方案层间既能放置大尺寸轴承，又不



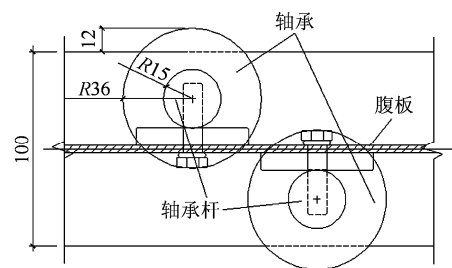
(a) 原方钢剖面图



(b) H 型钢剖面图



(c) H 型钢平面图



(d) H 型钢立面图

图 7 改进前后层间钢架 - 轴承系统详图(单位: mm)

Fig.7 Detail drawings of interlaminar steel frame-shafting bearing system before and after improvement (unit: mm)

表 2 2 种方案参数比较

Table 2 Parameters comparison of two schemes

框架类型	惯性矩		质量	
	数值/cm ⁴	变化率/%	数值/(kg · m ⁻¹)	变化率/%
方钢框架	183	-8	9.42	-19
H 型钢框架	169		7.66	
框架类型	轴承外径		层间间隙	
	数值/mm	变化率/%	数值/mm	变化率/%
方钢框架	16	350	22	-46
H 型钢框架	72		12	

注：变化率为相关参数变化值相对于方钢框架对应参数的百分比。

会增大层间间隙，这从根本上解决了模型箱自重、轴承尺寸、层间间隙之间的矛盾，使轴承尺寸的大小不会影响到层间间隙。

改进后, 剪切模型箱由原来的“抽屉式”变成了“堆叠式”, 受力机制更符合实际土体的成层特性。不仅使模型箱的层间框架起到了模拟土体边界的作用, 还使层间框架像实际土体那样成层堆叠而成。

改进后, 采用大尺寸轴承不仅可以大大提高轴承承载力, 而且由于在同一水平面上放置轴承数量较少, 可以很好地解决同一水平面上线性难以控制, 轴承很难同时受力的难题。这样的改进既节省了材料, 又减小了制作难度, 还降低了造价。

改进后, 层间间隙尺寸可以根据设计要求自行控制, 如果需要甚至可以实现层间间隙为 0。

(2) 在与振动方向垂直的侧面铆接一块厚 2 mm 的弹性钢板取代侧向的刚性约束系统, 既能限制钢框架垂直方向位移和台面土体质心和台面中心不重合等问题产生的平面扭转变形, 又能消除侧向约束系统对框架自由滑动剪切变形摩擦阻力的影响, 使层间框架的滑动剪切变形可以不受侧向约束系统的摩擦阻力影响。考虑到弹性钢板对层间方钢在振动方向上相对位移问题, 在钢板和方钢之间铆接 10 mm 厚的橡胶条, 这样既能提供更好的弹性, 又能解决钢板可能带来的方钢层间框架的限位问题。

为了了解铆接弹性钢板对整体结构自振频率的影响, 本文结合 ANSYS 软件对其在侧面铆接钢板的情况进行模拟。软件中, 模型箱的底部采用固定端, 方钢和弹性钢板之间采用耦合的方式来达到方钢在非主振方向上的变形受钢板控制的目的, 方钢单元逐层建立, 钢的弹性模量取为 2×10^5 MPa, 砂土的内摩擦角设为 35° 。结果显示其对模型箱和土体整体的动力特性影响很小(见图 8, 9 及表 3)。表 3 显示, 设置钢板和不设置钢板的理想情况相比, 一阶自振频率只增加了 1.72%, 高阶频率相差更小, 二阶自振频率则增加了 0.27%。

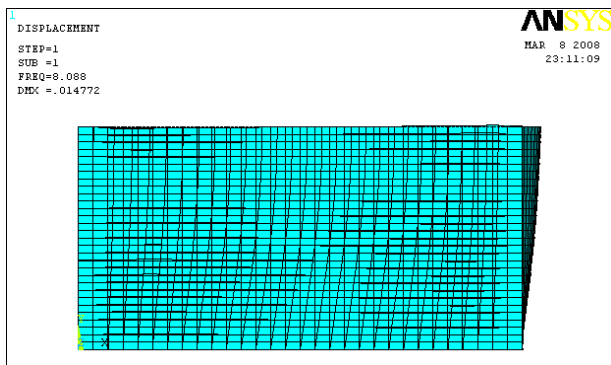


图 8 不设置钢板方案一阶振型侧视图

Fig.8 Side view of the first-order mode of scheme without steel plate

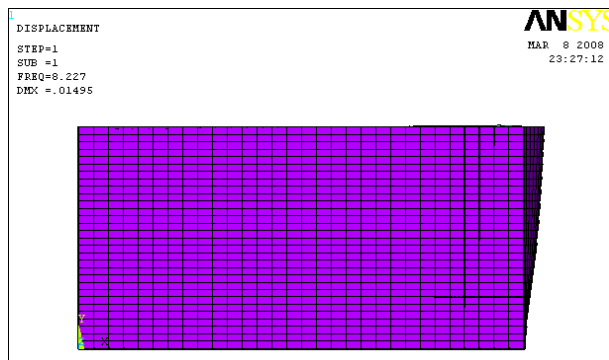


图 9 设置钢板方案一阶振型侧视图

Fig.9 Side view of the first-order mode of scheme with steel plate

表 3 2 种方案模型箱和地基土自振频率比较

Table 3 Comparison of the natural frequency of vibration between model and foundation soil

方案	一阶自振频率	二阶自振频率
不设置钢板	8.087 8	9.423 2
设置钢板	8.226 8	9.448 2

4 结 论

本文对现有模型箱设备的轴承系统强度问题、框架侧向摩擦问题、框架剪切变形问题提出了一些改进:

(1) 采用 H 型钢和方钢交互堆叠, 并在 H 型钢腹板的两面均安置轴承的方式, 取代了原有的全方钢框架模型箱, 并在非主振方向上铆接钢板代替了原侧向约束系统。

(2) 改进后的模型箱减轻了自重, 减小了层间框架约束; 降低了土体和模型箱由于惯性作用产生的相互作用力; 模型箱受力方式由“抽屉式”变为“堆叠式”, 更接近于实际土体受力; 减小了轴承数量, 降低了制作过程中线性调平的难度。

(3) 非主振方向上铆接弹性钢板和弹性橡胶条, 消除了侧向约束系统对层间框架的滑动剪切变形摩擦阻力的影响。

(4) 改进后的模型箱具有整体稳定性好、质量小、强度大、循环利用率高、受力机制合理等突出特点。

参考文献(References):

[1] 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))
- [2] 黄春霞. 碎石桩复合地基抗液化性能试验研究[博士学位论文][D]. 北京: 北京交通大学, 2005.(HUANG Chunxia. Study on characteristic of stone columns composite foundation liquefaction resistance[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005.(in Chinese))
- [3] 韦晓, 范立础, 王君杰. 考虑桩-土-桥梁结构相互作用振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 91 - 97.(WEI Xiao, FAN Lichu, WANG Junjie. Shake table test on soil-pile-structure interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 91 - 97.(in Chinese))
- [4] 凌贤长, 王丽霞, 王东升, 等. 非自由液化场地地基动力性能大型振动台模型试验研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 34 - 39(LING Xianchang, WANG Lixia, WANG Dongsheng, et al. Study large-scale shaking table proportional model test of the dynamic property of foundation in unfreedom ground of liquefaction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 34 - 39.(in Chinese))
- [5] 蒋关鲁, 刘先峰, 张建国, 等. 高速铁路液化土地基加固的振动台试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(2): 190 - 196.(JIANG Guanlu, LIU Xianfeng, ZHANG Jianwen, et al. Shaking table test of composite foundation reinforcement of saturated silty soil ground for high speed railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(2): 190 - 196.(in Chinese))
- [6] 陈国兴, 庄海洋, 杜修力, 等. 土-地铁车站结构动力相互作用大型振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(2): 171 - 176.(CHEN Guoxing, ZHUANG Haiyang, DU Xiuli, et al. Analysis of large-scale shaking table test of dynamic soil-subway station interaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(2): 171 - 176.(in Chinese))
- [7] GIBSON A D. Physical scale modeling of geotechnical structures at one-g[Ph. D. Thesis][D]. Pasadena, USA: California Institute of Technology, 1997.
- [8] PRASAD S K, TOWHATA I, CHANDRADHARA G P, et al. Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering[J]. Current Science, 2004, 87(10): 1398 - 1404.
- [9] UENG T S, CHEN C H. Liquefaction of sand under multidirectional shaking table tests[C]// Proceedings of the International Conference on Physical Modeling in Geotechnics(ICPMG'06). Hong Kong: [s.n.], 2006: 481 - 486.
- [10] PAMUK A, GALLAGHER P M, ZIMMIE T F. Remediation of piled foundations against lateral spreading by passive site stabilization technique[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(7): 864 - 874.
- [11] PITILAKIS D, DIETZ M, WOOD D M, et al. Numerical simulation of dynamic soil-structure interaction in shaking table testing[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, 28(6): 453 - 467.
- [12] 楼梦麟, 宗刚, 牛伟星, 等. 土-桩-钢结构相互作用体系的振动台模型试验[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 226 - 230.(LOU Menglin, ZONG Gang, NIU Weixing, et al. Shaking table model test of soil-pile-steel structure interaction system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(5): 226 - 230.(in Chinese))
- [13] 陈国兴, 庄海洋, 程绍革, 等. 土-地铁隧道动力相互作用的大型振动台试验: 试验方案设计[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(6): 178 - 183.(CHEN Guoxing, ZHUANG Haiyang, CHENG Shaoguo, et al. A large-scale shaking table test for dynamic soil-metro tunnel interaction: test scheme[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(6): 178 - 183.(in Chinese))
- [14] TURAN A, HINCHBERGER S D, NAGGAR H E. Design and commissioning of a laminar soil container for use on small shaking tables[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(2): 404 - 414.
- [15] 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 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 - 2134.(in Chinese))