

ZJU400 离心机研制及其振动台性能评价

陈云敏^{1,2}, 韩超^{1,2}, 凌道盛^{1,2*}, 孔令刚^{1,2}, 周燕国^{1,2}

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 土工离心机可以产生与原型相同的自重应力, 保证模型破坏机制与原型一致, 是解决岩土工程、水利工程和环境工程等领域复杂问题的理想试验模拟手段。搭配机载振动台系统, 离心机还可以在原型应力条件下探讨地震引起的建筑物变形和稳定特性。鉴于离心机振动台的科研价值, 浙江大学建造了有效旋转半径为 4.5 m、负载能力 400 g·t 的双吊篮臂式离心机, 可开展 150g 重力加速度下的静态试验和 100g 重力加速度下的动态试验, 吊篮尺寸达 1500 mm×1200 mm×1500 mm。同时, 离心机配置了最大振动幅值为 0.6 cm、最大振动加速度为 40g 的振动台系统, 可进行有效负重小于 500 kg 水平单向地震响应模拟。静动力试验使用的刚性模型箱和层状剪切模型箱的最大尺寸分别为 1.2 m×1.0 m×1.0 m 和 600 mm×350 mm×449 mm。通过饱和砂土地基建筑物震陷试验, 初步检验了离心机振动台系统的整体性能。

关键词: 离心机; 振动台; 性能评价; 饱和砂土; 震陷

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)12-1887-08

作者简介: 陈云敏(1962-), 男, 教授, 主要从事环境土工、土动力学和基础工程方面的研究。E-mail: chenyunmin@zju.edu.cn。

Development of geotechnical centrifuge ZJU400 and performance assessment of its shaking table system

CHEN Yun-min, HAN Chao, LING Dao-sheng^{*}, KONG Ling-gang, ZHOU Yan-guo

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenviromental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: As an ideal experimental simulation method, geotechnical centrifuge can generate the same gravity stress as the prototype, guarantee the consistency of model deformation and failure mechanism between the centrifugal model and real objects and solve complex problems in geotechnical engineering, hydraulic engineering and environmental engineering etc. Working with a shaking table system, the centrifuge can be employed to study the seismic deformation and stability characteristics under the prototype stress. In view of the scientific values of the centrifuge and shaking table, Zhejiang University has developed one of the largest geotechnical centrifuges in China. The beam type centrifuge has double platforms with a payload capacity of 400 g·t and an effective arm radius of 4.5 m. The maximum centrifugal acceleration is 150g for static tests and 100g for dynamic tests. The centrifuge platforms have overall dimensions of 1.5 m×1.2 m×1.5 m. Meanwhile, an in-flight uni-axial electro-hydraulic shaker has been made for the centrifuge to simulate seismic excitation. Within the payload of 500 kg, the maximum lateral displacement and acceleration are 0.6 cm and 40g. Rigid and laminar containers are used to prepare the model, whose maximum dimensions are 1.2 m×1.0 m×1.0 m and 600 mm×350 mm×449 mm. The performance of the shaking table system of the centrifuge is evaluated through an experiment on seismic differential settlement of buildings on saturated sand.

Key words: centrifuge; shaking table; performance assessment; saturated sand; seismic settlement

0 引言

岩土工程、水利工程和环境工程等研究中, 单元体试验、缩尺模型试验和场地原位试验是常见的分析手段。单元体试验主要用于认识岩土体介质的基本工程性质, 其分析对象的几何尺度较小。若研究课题涉

基金项目: 国家自然科学基金项目(50809060, 50908207); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010XZZX001, 2010KYJD006); 973 计划项目(2007CB714203); 中国地震局地震行业科研专项(200808022)

收稿日期: 2010-11-01

*通讯作者

及到土工单体或场地，就需要使用原位试验或缩尺模型试验。原位试验最大的优点是场地条件完全真实，其试验结果相对可靠，但对于爆破、污染物扩散、地震破坏等问题，由于所处环境介质复杂、多相多场相互作用强烈、时空跨度大，通常很难在现场进行全过程监测。相比之下，缩尺模型试验在揭示这些过程的机理、验证科学理论和解决工程技术问题时，更为灵活有效。缩尺模型试验主要包括常规重力条件($1g$)的模型试验和离心机试验(Ng)。由于众多物理、力学和化学现象及变化过程都受重力支配，其特性随重力水平而变化。常规重力条件下的缩尺模型无法产生与原型相同的应力场，因而不能再现原型特性。而应用超重力技术可以补偿模型因缩尺造成的应力损失，实现模型应力水平与原型等效，是解决这一问题的最有效途径^[1-5]。因此自20世纪60年代以来，世界上共建造了约200多台土工离心机，用于各领域的科学的研究和指导工程实践^[6-9]。

伴随着离心机技术的飞速发展，英国、日本和美国等国的离心机实验室还研制了爆炸激振^[10]、压电激振^[11]和电磁激振^[12]等多种离心机振动系统以开展地震响应模拟。目前，国际上主流的离心机振动台一般采用电液伺服控制振动系统，其优点是振动能力强、可模拟各种振幅和振动频率下的波形。振动台也逐渐从水平单向振动发展到水平双向振动和水平向-垂直向同时施振。国内多家科研单位，如中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、清华大学、同济大学和香港科技大学等均建造了离心机实验室，而且已经配备或正在新建振动台设备，其中香港科技大学已经在2001年投入使用了水平双向离心机振动台^[4, 13]；中国水利水电科学研究院筹建的大型水平-垂直双向振动台，其技术指标也达到世界先进水平^[4]。借助于离心机和振动台系统，中国学者也开展了大量土工离心模型试验，研究内容涉及地基与基础的静动力响应分析^[7, 14]、建筑液化震陷^[9]、堤坝^[15]和边坡^[16-17]的变形及稳定性评价、地下结构地震破坏与上浮^[18-19]和污染物运移^[20]等多个方面，取得了丰硕的科研成果。

鉴于离心机振动台系统在揭示科学问题上的优势，浙江大学建造了负载能力为 400 gt 的双吊篮大型离心机，配置了最大振动幅值为 0.6 cm 、最大振动加速度为 $40g$ 的振动台系统，并且提供了刚性模型箱和层状剪切模型箱用以满足静力和动力试验的需要。本文详细介绍了浙江大学ZJU400离心机及振动台系统的主要技术指标和相关配套设施，并通过饱和砂土上的建筑物震陷试验对系统整体性能进行初步评价。

1 ZJU400 土工离心机

1.1 离心机的空间布置

ZJU400 土工离心机由浙江大学和中国工程物理研究院联合研制，为电机驱动式，采用双吊篮工作方式，其最大运行能力为 400 gt ，最大离心加速度 $150g$ ，最大有效旋转半径 4.5 m 。离心机在静力试验中可以在负载 2500 kg 的 $150g$ 重力加速度下工作；动力试验中配合振动台的性能，离心加速度可达 $100g$ 。

离心机在空间上分为3层(图1)。地上一层为上仪器舱，由舱体、龙门架、集流环支架及附属设施组成，主要负责信号的转接。此外，离心机主控制室也在地上一层，主控制室集成了与离心机相关的控制系统，实现主机运行、数据采集、动态模拟以及摄像等控制。地下一层为试验工作区域，布置有离心机主机转动系统(静态吊篮、支架、转臂等)、传动系统和下仪器舱(为信号通道扩容、二次开发做准备)。地下二层主要为离心机驱动系统、稀油润滑系统和油、水、气供给系统等。

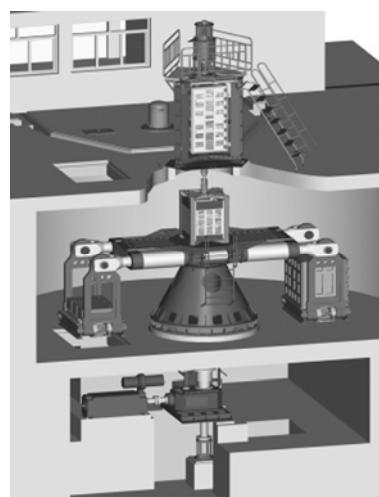


图1 ZJU400 离心机空间布置图

Fig. 1 Elevation view of centrifuge ZJU400

1.2 上下仪器舱

上仪器舱有效容积为 $0.9\text{ m}\times0.9\text{ m}\times1.8\text{ m}$ (图2(a))，内部设可调安装板，用于放置动静态采集板等元器件，可根据使用需要自由划分仪器舱内部安装空间。用于转接信号及电力滑环输出的集流环即位于此处。下仪器舱为四立柱式框架结构(图2(b))，有效容积 $0.88\text{ m}\times0.72\text{ m}\times1.16\text{ m}$ 。整个下仪器舱安装在转臂支承上，4个空心立柱与转臂支承相应位置上开设的方孔对正，以保证由上仪器舱布设下来的测控线缆通过转臂支承顺利达到臂架端部。

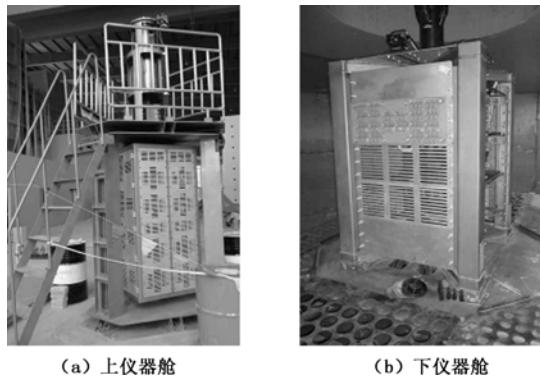


图 2 上下仪器舱

Fig. 2 Upper and lower instrument rooms

1.3 传动和转动系统

地下一层的试验工作区域主要布置了离心机的传动和转动系统(图3)。传动系统主要由主轴承系、钟罩及底座组成。传动系统最外侧为钟罩, 其承重部分为50°锥体, 内装主轴承系并通过螺钉与底座相联, 安装后高度为1.73 m, 下端最大径向尺寸2.56 m。主轴承系主要负责将扭矩传递给转动系统。为了保证主轴承系安全工作, 控制轴承工作温度, 离心机采用强制循环的方式对轴承进行润滑与冷却, 即对主轴承系所属轴承进行逐点供油, 并于供油点附近设置监测点, 安装温度传感器, 对轴承工作温度实施实时监测。



图 3 试验工作区的离心机

Fig. 3 Centrifuge installed at test work area

转动系统是主机运转中承受动、静载荷的关键部件, 采用对称臂、双吊篮的结构形式, 吊篮尺寸为1.5 m×1.2 m×1.5 m。转动系统分为动静态工作吊篮、臂架、转臂支承、不平衡力检测机构和臂架装饰罩及踏板(图4)。臂架上安装了测力传感器以监测运行过程中产生的不平衡力。当不平衡力超过最大载荷的5%, 即200 kN时, 监测机构会输出状态信号到主控控制单元, 通过联锁电路使离心机停止运行。

1.4 动力传输和稀油润滑系统

动力传输系统位于地下二层, 主要由直流电机、联轴器和减速器组成。离心机开始工作后, 直流电机带动联轴器向主轴传递扭矩。设计中离心机的最大负载扭矩为19237.7 N·m, 最大负载功率为433.2 kW, 所以选择直流电机的最大功率为550 kW。减速器主要

起变速、换向、传递扭矩和驱动负载的作用, 负载扭矩约为28.04 kN·m。

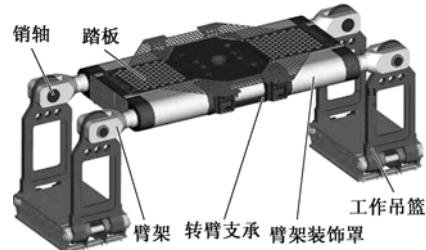


图 4 离心机转动系统

Fig. 4 Rotating system of centrifuge

稀油润滑系统的功能是利用循环油对减速器齿轮和主轴系各轴承进行润滑, 并带走各处摩擦产生的热量, 起到强制循环冷却润滑的作用。它从稀油站引出4路供油, 分别为减速器和主轴承系供油(图5)。



图 5 动力传输和稀油润滑系统

Fig. 5 Driving system and thin oil lubrication system

2 振动台系统

离心机振动台由浙江大学与日本 Solution 公司联合研制, 为电液伺服液压驱动式, 实现水平单向振动(图6)。它主要由电液激振系统、高压油源、蓄能器、管路系统、控制系统和测试系统等组成。



图 6 振动台系统

Fig. 6 Shaking table system

振动台最大工作离心加速度为100g, 振动幅值范围为±0.6 cm, 最大振动加速度和速度分别为40g和150 cm/s, 频率范围10~200 Hz。振动台台面尺寸为0.9 m×0.8 m, 最大负载500 kg, 图7详细描述了振动台的性能指标。振动台可通过计算机无线控制, 振动

频率、波形和幅值可以任意设定。离心机振动台工作时, 待吊篮完全展开稳定后, 振动台平行于离心机主轴上下振动(图 8), 这样的设计可以减小运行过程中 Coriolis 加速度的影响, 保证了内部应力场的均匀^[2]。

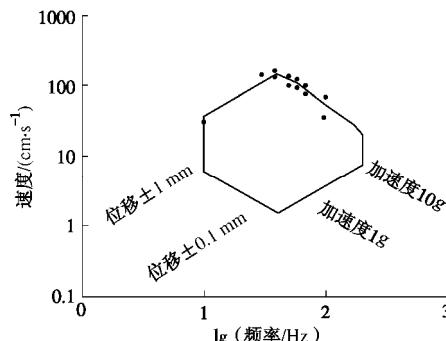


图 7 振动台振动性能图

Fig. 7 Performances of shaking table

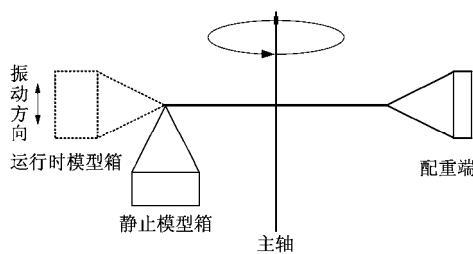


图 8 运行时离心机和振动台示意图

Fig. 8 Schematic diagram of centrifuge and shaking table in running

3 刚性模型箱和层状剪切模型箱

实验室配置了大、小不同的刚性模型箱各一个(图 9), 刚性箱是由高强度螺栓将铝合金板联接而成。在模型箱的一个侧面上设置了有机玻璃观察窗。大模型箱有效容积(长×宽×高)为 1.2 m×1.0 m×1.0 m, 小模型箱为 1.0 m×0.4 m×1.0 m。模型其它参数见表 1。

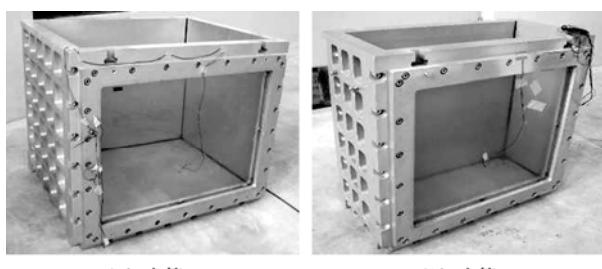


图 9 刚性模型箱

Fig. 9 Rigid model container

表 1 刚性剪切箱基本参数

Table 1 Basic parameters of rigid model container

模型箱	工况 /g	箱体质量 /kg	模型质量 /kg	总质量 /kg
大	100	1019	1620	2639.3
	150		1648.1	2667.4
小	150	627	720	1346.9

层状剪切箱箱体由 20 层高度为 22.5 mm 的矩形实心铝合金框叠合而成, 各层框之间由约 1 mm 的轴承联结(图 10)。这种设计概念由 Whitman 等^[21]于 1986 年提出, 可以通过有限尺寸的模型模拟半无限场地的土体行为。模型箱内部长 600 mm、宽 350 mm、高 449 mm, 内侧贴有 2.5 mm 厚橡胶膜为模型饱和提供防水保护, 箱底布置有透水石用于模型饱和。为便于试验, 层状模型箱上内置了位移传感器。



图 10 剪切模型箱和位移传感器

Fig. 10 Laminar container and displacement transducers

使用剪切模型箱制作模型时, 须将箱体两侧的挡板固定, 以免框架间发生错动。模型制备完毕后, 箱体通过螺栓固定在振动台上, 如图 11 所示。

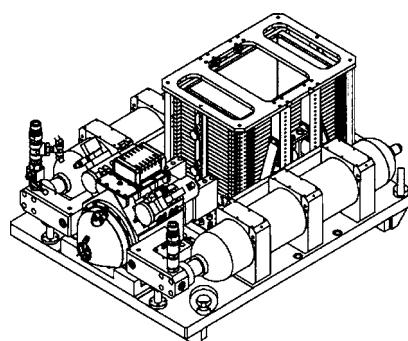


图 11 装配完毕后的剪切箱和振动台

Fig. 11 Laminar container and shaking table after assembly

4 数据测量采集系统

数据测量系统由静态测量系统和动态测量系统两部分组成。静、动态测量系统分别选用不同的数据采集模块、工控机及数据采集与处理软件。

静态测量系统采用 4 块 IMP 数据采集模块、工控机及相应接口组成 40 通道静态数据测量系统, 能测应变信号、电压信号及温度信号(图 12)。应变测量的灵敏度为 $1.0 \mu\epsilon$, 温度测量(铂电阻)时灵敏度为 0.1, 直流电压测量量程为 200 mV 和 2V 时的灵敏度分别是 $10 \mu\text{V}$ 和 $100 \mu\text{V}$ 。采集模块安装在上仪器舱内, IMP 模块的输出接三芯专用电缆, 被测信号经数字化处理后, 通过集流环和专用数据传输网络送至地面数据采集计算机。应变传感器接入静态侧转臂端头处的航空插座, 航空插座连接到位于下仪器仓侧面的 ZJ-1 转接

板, 经过 ZJ-1 转接板接入采集模块; 电压型传感器经变换器接入 ZJ-1 转接板, 然后到采集模块。

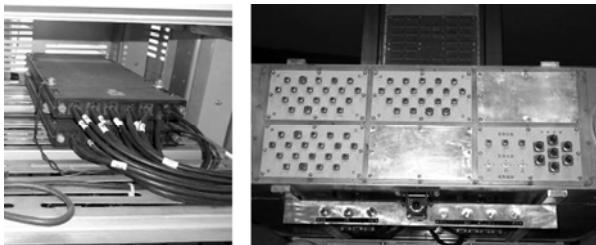


图 12 IMP 静态数据采集器和 ZJ-1 转接板

Fig. 12 IMP static data acquisition system and ZJ-1 exchange board

动态测量系统采用 3 块 IMC 数据采集模块、工控机(与静态共用)及以太网组成 32 通道动态数据采集系统, 其中 16 通道为应变测量, 其余为电压测量(图 13)。电压测量模块采样率为 20 kHz/50 kHz(4 通道)/100 kHz(2 通道), 带宽 14 kHz。应变测量模块最大采样率 20 kHz, 带宽 5 kHz。采集模块同样安装在上仪器舱内, 应变传感器接入静态侧或动态侧转臂端头处的航空插座, 航空插座接线连接到采集模块; 电压型传感器经变换器接入 ZJ-2 转接板, 然后连接到采集模块; ICP 型传感器接入动态转臂端头处的航空插座。信号经数字化处理后, 由以太网送到地面测量计算机。

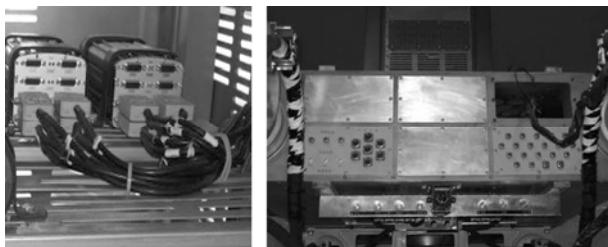


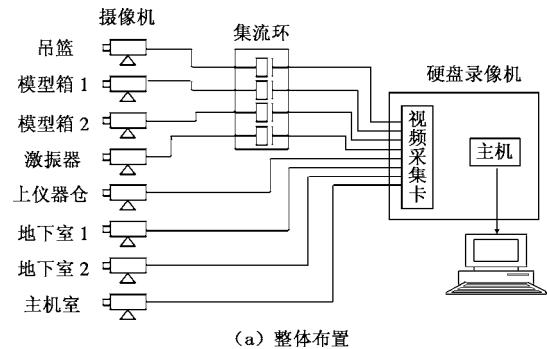
图 13 IMC 动态数据采集器和 ZJ-2 转接板

Fig. 13 IMC dynamic data acquisition system and ZJ-2 exchange board

5 摄影和视频监视系统

摄影系统由数码相机、高速闪光控制仪、计算机、闪光灯、位置检测和闪光检测等部分组成, 主要完成静态工作吊篮端试验模型在运动过程中的定点摄影。

视频监视系统由 CCD 摄像机、显示器、硬盘录像机、视频采集卡和网卡组成。系统设置 8 路摄像机(图 14), 监视部位有: 离心机转臂端 2 路, 激振器和静态吊篮各 1 路, 分别监视吊篮、模型箱和动态模型实验; 离心机上仪器仓 1 路, 监视测量设备运行情况; 地下室 2 路, 监视传动系统和旋转接头工作情况; 离心机主机室 1 路, 监视离心机转臂系统工作情况。



(a) 整体布置



(b) 旋转接头监视



(c) 模型箱监视

图 14 视频监视系统

Fig. 14 Video monitoring system

6 离心机振动台系统性能评价

6.1 震陷试验介绍

实验室为对离心机振动台系统及剪切箱的性能进行初步评价, 开展了饱和砂土地基上的建筑物不均匀震陷试验。试验所用砂土为国际通用的标准砂——日本丰浦砂(Toyoura sand), 对其静动力特性的研究目前已经比较充分^[22], 砂土的基本物性参数见表 2。砂土初始相对密度为 40%。

表 2 丰浦砂的基本物性参数

Table 2 Material properties of Toyoura sand

平均粒径 D_{50}/mm	不均匀 系数 C_u	最大孔隙 比 e_{\max}	最小孔隙 比 e_{\min}	颗粒比重 G_s
0.16	1.3	0.997	0.605	2.64

建筑物模型由铝合金制成, 布置在地基表面正中间, 基本尺寸见图 15, 模型整体上沿长轴方向偏心。由于本次试验的目的是初步评价离心机振动台的整体性能, 因此试验选择纯水作为饱和流体。

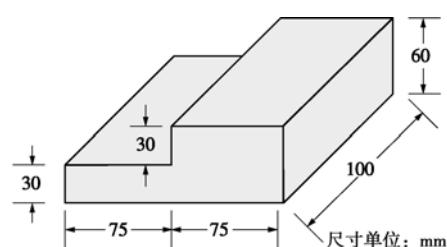


图 15 结构模型示意图

Fig. 15 Schematic diagram of structural model

模型的制备使用了砂雨法, 约每50mm填筑一层, 制样完毕后, 利用模型箱下部透水石进行饱和。模型内传感器布置方式如图16所示。本次试验中共使用三轴加速度传感器1个(A0)、单轴加速度传感器13个(A1~A13)和4个位移传感器(L1~L4)。

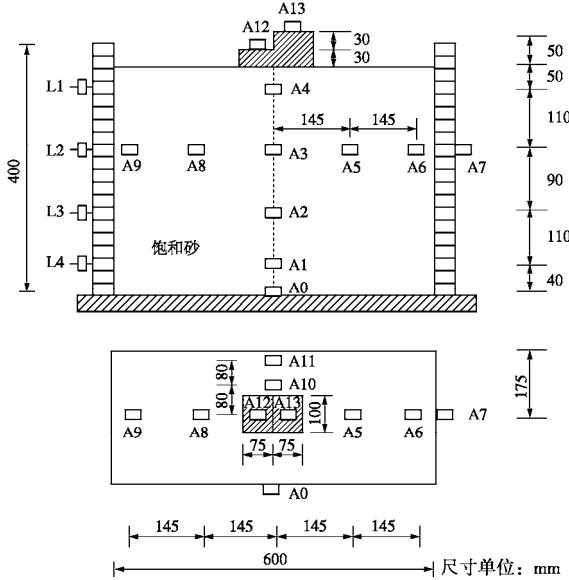


图16 模型传感器布置图

Fig. 16 Arrangement of transducers in model

地震输入采用VELACS模型中的地震波形^[9], 卓越频率为2 Hz, 时程曲线如图17所示。试验中将加速度分别调幅至0.05g, 0.25g和0.50g, 运行离心加速度为50g。

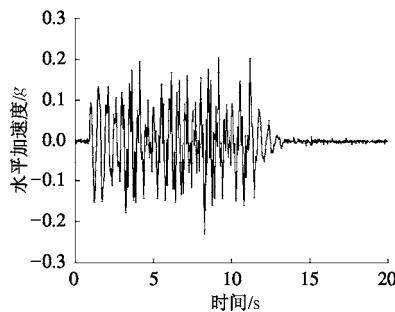
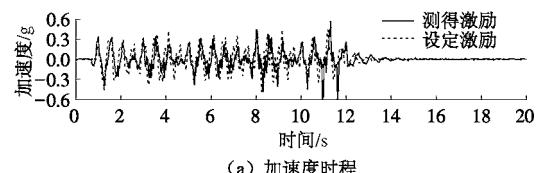


图17 VELACS模型地震输入

Fig. 17 Seismic input motion of VELACS model

6.2 试验结果及分析

设定地震激励与振动台台面实际输出激励的差异是评价振动台性能的重要指标之一。设定激励幅值为0.50g时与台面加速度的对比情况如图18所示, 测得加速度已经还原到1g环境下。从测得的台面加速度与设定加速度全时程对比可知, 振动台较好地描述了设定地震波的频谱特性。



(a) 加速度时程

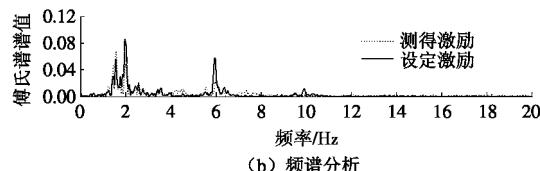


图18 设定激励与台面激励对比

Fig. 18 Comparison between set excitation and table excitation

将振动台上x, y方向的加速度提取出来(x向为主振方向, y向为水平垂直于主振的方向), 可知y向加速度在量级上较小, 满足设计要求(图19)。

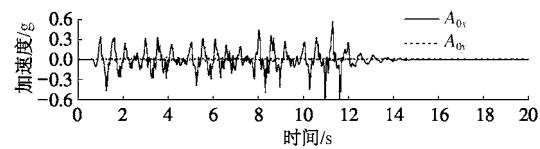


图19 x-y方向加速度分量比较

Fig. 19 Comparison between x and y-direction acceleration components

为探讨边界效应对场地响应的影响, 在模型埋深为160 mm处主振方向、距离中轴线不同位置埋设了多个加速度传感器。由于地表建筑物的影响深度有限, 在0.05g小震的情况下, 各时程曲线基本重合, 边界效应可忽略不计。即使激励强度增大到0.50g, 同层深度加速度响应仍具有较好的均匀性(图20)。短轴方向从传感器结果(A10和A11)知, 0.5g时也基本不受边界效应影响。

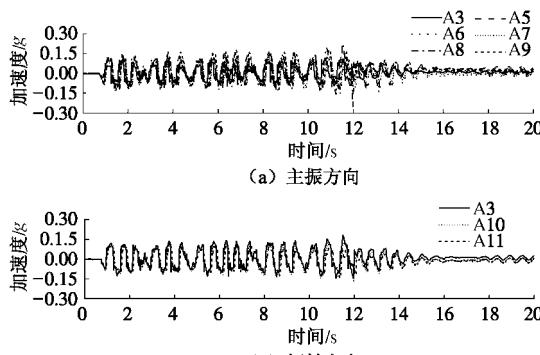


图20 剪切箱的边界效应

Fig. 20 Boundary effects of laminar container

将激励强度增大到0.50g时、不同埋深处的加速度时程提取出来, 峰值加速度对应时刻自下而上逐渐增大, 振动的传播效应比较明显(图21)。表层砂土加速度较深层明显减小, 显示砂土传递剪切波的能力下降, 这是表层砂土一定程度上液化所致, 这也直接导致了地表建筑物的震陷。

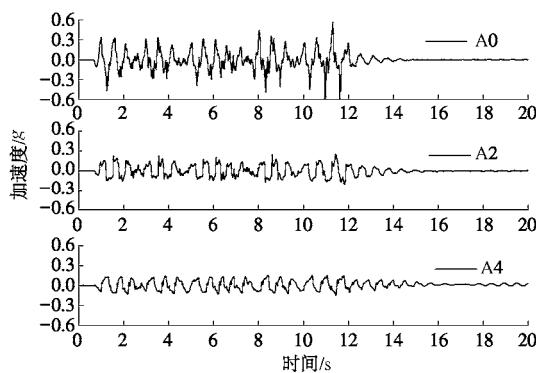


图 21 模型不同深度处的加速度响应 (0.5g)

Fig. 21 Acceleration response at different depths (0.5g)

从位移响应上来看, 整个模型箱是偏向负向一侧发生变形的, 模型表层变形较深部要大(图 22)。试验完毕后测得土体表面沉降较为均匀, 结构发生明显的不均匀震陷, 较高一侧沉陷较大, 说明离心机振动台很好地再现了建筑物不均匀震陷的行为(图 23)。

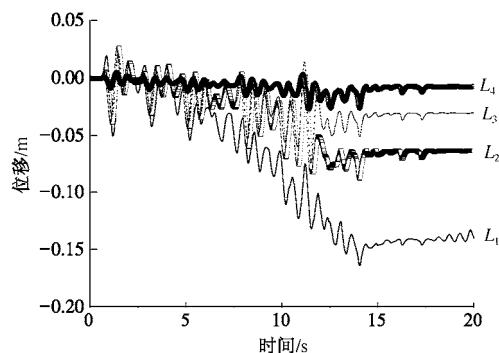


图 22 模型不同深度处位移响应 (0.5g)

Fig. 22 Displacement response at different depths (0.5g)

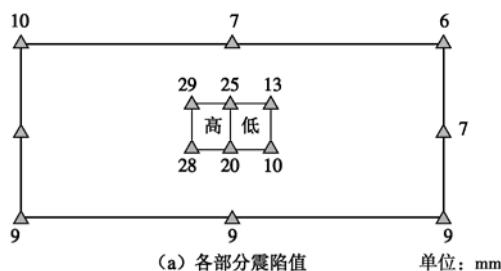


图 23 模型表面和结构的震陷

Fig. 23 Seismic settlement of model surface and structure

7 结语

本文对浙江大学 ZJU400 离心机及振动台系统的性能和组成进行了较为详细的介绍, 性能为 400 gt 的离心机和最大振动幅值为 0.6 cm、最大振动加速度为 40g 的振动台系统可为多个学科科学研究和工程实践服务。从震陷验证性试验中可知, 试验所采用的叠环式模型箱较好地模拟了场地土层的剪切变形和振动响应, 且较大程度地减小了边界效应的影响; 振动台的激振性能、传感器与数据采集系统的使用效果良好, 从而为后续有关试验奠定了基础。

参考文献:

- [1] 包承纲. 我国离心模拟试验技术的现状与展望[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(6): 92–97. (BAO Cheng-gang. The state and prospect of centrifuge model in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(6): 92–97. (in Chinese))
- [2] TAYLOR R N. Geotechnical centrifuge technology[M]. London: Blackie Academic & Professional, 1995.
- [3] 黄志全, 王思敬. 离心模型试验技术在我国的应用概况[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 199–203. (HUANG Zhi-quan, WANG Si-jing. A survey of application of centrifugal model testing in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 199–203. (in Chinese))
- [4] 侯瑜京. 土工离心机振动台及其试验技术[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(1): 15–22. (HOU Yu-jing. Centrifuge shakers and testing technique[J]. Journal of China Institute of Water Resource and Hydropower Research, 2006, 4(1): 15–22. (in Chinese))
- [5] 陈云敏, 陈仁朋, 詹良通, 等. 岩土工程的多尺度试验[C]// 第 25 届全国土工测试学术研讨会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 2008: 43–56. (CHEN Yun-min, CHEN Ren-peng, ZHAN Liang-tong, et al. The multi-scale tests in geotechnical engineering[C]// Proc of 25th China National Symposium on Geotechnical Testing. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008: 43–56. (in Chinese))
- [6] YANG D, NAESGAARD E, BYRNE P M, et al. Numerical model verification and calibration of George Massey Tunnel using centrifuge models[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(5): 921–942.
- [7] BYRNE P M, PARK S S, BEATY M, et al. Numerical modeling of liquefaction and comparison with centrifuge tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(2): 193–

- 211.
- [8] KONG L G, ZHANG L M. Centrifuge modeling of torsionally loaded pile groups[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2007, **133**(11): 1374 – 1384.
- [9] ZHOU Y G, CHEN Y M, SHAMOTO Y. Verification of the soil-type specific correlation between liquefaction resistance and shear-wave velocity of sand by dynamic centrifuge test [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2010, **136**(1): 165 – 177.
- [10] ZELIKSON A, DEVAURE B, BADEL D. Scale modeling of soil structure interaction using a programmed series of explosions during centrifugation[C]// Proc Int Conf on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 1981, 361 – 366.
- [11] ARULANANDAN K, CANCLINI J, ANANDARAJAH A. Simulation of earthquake motions in the centrifuge[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1982, **108**(5): 730 – 742.
- [12] FUJII N. Development of an electromagnetic centrifuge earthquake simulator[C]// Proc of Int Conf Centrifuge, 1991: 351 – 354.
- [13] NG C W W, LI X S, LAAK P A V, et al. Centrifuge modeling of loose fill embankment subjected to uni-axial and bi-axial earthquakes[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2004, **24**(4): 305 – 318.
- [14] 刘守华, 蔡正银, 徐光明, 等. 超深厚吹填粉细砂地基大型离心模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, **26**(6): 846 – 850. (LIU Shou-hua, CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, et al. Centrifuge modeling of the silty sand foundation of super-high fill[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(6): 846 – 850. (in Chinese))
- [15] 张延亿, 徐泽平, 温彦锋, 等. 糯扎渡高心墙堆石坝离心模拟试验研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2008, **6**(2): 86 – 92. (ZHANG Yan-yi, XU Ze-ping, WEN Yan-feng, et al. Centrifugal modeling test on the Nuozhadu high central core earth-rockfill dam[J]. *Journal of China Institute of Water Resource and Hydropower Research*, 2008, **6**(2): 86 – 92. (in Chinese))
- [16] 高长胜, 陈生水, 徐光明, 等. 堤防边坡稳定离心模型试验技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(23): 4308 – 4312. (GAO Chang-sheng, CHEN Sheng-shui, XU Guang-ming, et al. Centrifugal model test on slope stability of levee project[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(23): 4308 – 4312. (in Chinese))
- [17] 张嘎, 牟太平, 张建民. 基于图像分析的土坡离心模型试验变形场测量[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(1): 94 – 97. 2007. (ZHANG Ga, MU Tai-ping, ZHANG Jian-min. Displacement measurement using image analysis in centrifuge modeling of slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(1): 94 – 97. (in Chinese))
- [18] 刘光磊, 宋二祥, 刘华北, 等. 饱和砂土地层中隧道结构动力离心模型试验[J]. *岩土力学*, 2008, **29**(8): 2070 – 2076. (LIU Guang-lei, SONG Er-xiang, LIU Hua-bei, et al. Dynamic centrifuge tests on seismic response of tunnel in saturated sandy foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(8): 2070 – 2076. (in Chinese))
- [19] 黄茂松, 曹杰. 隧道地震响应简化分析与动力离心试验验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(2): 271 – 280. (HUANG Mao-song, CAO Jie. Simplified analysis of tunnel earthquake response and centrifuge modelling calibration[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(2): 271 – 280. (in Chinese))
- [20] 张建红, 劳敏慈, 胡黎明. 非饱和土中水分迁移及污染物扩散的离心模拟[J]. *岩土工程学报*, 2002, **24**(5): 622 – 625. (ZHANG Jian-hong, LO I M C, HU Li-ming. Centrifuge modeling of moisture and contaminant migration in unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **24**(5): 622 – 625. (in Chinese))
- [21] WHITMAN R V, LAMBE P C. Effect of boundary conditions upon centrifuge experiments using ground motion simulation [J]. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 1986, **9**(2): 61 – 71.
- [22] HYODO M, TANIMIZU H, YASUFUKU N, et al. Undrained cyclic and monotonic triaxial behaviour of saturated loose sand[J]. *Soils and Foundations*, 1994, **34**(1): 19 – 32.