

土工动力离心模型试验研究进展

陈正发¹, 于玉贞²

(1. 山东理工大学 建筑工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 由于土工动力离心模型试验的优越性, 欧美、日本等一些国家相继发展不同种类的土工离心机振动台系统。土工动力离心模型试验研究的不断深入, 推动与之相关的振动台模型箱的发展。介绍各种土工离心机振动台系统的特点和工作原理; 对比国内研制的土工离心机振动台系统的主要技术指标, 介绍各种模型箱的特点和适用范围。从土工动力离心模型试验的研究范围、研究内容和研究深度等方面概述自离心机振动台应用于岩土工程以来, 世界范围内土工动力离心模型试验的研究进展。

关键词: 土力学; 离心机; 振动台; 离心模型试验

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 4026 - 08

A REVIEW ON DEVELOPMENT OF GEOTECHNICAL DYNAMIC CENTRIFUGAL MODEL TEST

CHEN Zhengfa¹, YU Yuzhen²

(1. School of Construction Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Since 1980s, geotechnical dynamic centrifugal model test has been gradually developed all over the world. Because of the virtues of geotechnical dynamic centrifugal model test, a variety of shaking table systems for geotechnical centrifuge were invented in Europe, America, Japan and other countries. With the development of the geotechnical dynamic centrifugal model test, different kinds of shaking table containers were also created at the same time. The development of the shaking table systems for geotechnical centrifuge, the parameters of the shaking tables for centrifuge in China, and the characteristics and application of shaking table containers were mainly described. Simultaneously, the development of the geotechnical dynamic centrifugal model test was introduced including its study range, depth and content.

Key words: soil mechanics; centrifuge; shaking table; centrifugal model test

1 引言

早在 20 世纪 40 年代, 前苏联就曾把离心机应用于研究有关成坑和爆炸荷载的动力问题。研究者之所以把目光投向离心机, 是因为相对于昂贵和未

知的现场测试来说, 用离心机模型试验来研究武器功效要比现场试验更为优越。20 世纪 70 年代, 美国和英国也进行了相似的动力离心模型试验研究。从 20 世纪 80 年代初期开始, 用离心机模拟地震问题已经在世界范围逐渐发展起来。由动力离心机模型试验所获得的试验数据对于工程师们更好地理

收稿日期: 2005 - 12 - 29; **修回日期:** 2006 - 04 - 28

基金项目: 清华大学基础研究基金资助项目(JC2002007)

作者简介: 陈正发(1971 -), 男, 硕士, 1996 年毕业于山东科技大学土木工程系建筑工程专业, 现任讲师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。
E-mail: chenzhengfa@tsinghua.org.cn

解岩土工程地震问题的潜在机制, 校核数值程序以及现场的结构设计等都有很大帮助^[1]。

以往用于研究地震破坏的方法大致可分为 3 类: (1) 震灾调查。通过对地震破坏现象的调查, 研究分析地震的破坏机制及防(抗)震措施。由于地震无法预测, 更无法控制, 这类研究比较表面, 而且不能重复, 普遍性差。(2) 数值模拟与理论分析。根据室内单元土体的试验结果, 找出规律, 提出假设, 再根据某一条件来预测结构的整体行为。由于土本身的复杂性及土的本构模型、计算参数的不确定性, 目前仍难达到定量的水平, 预测值与实际往往相差很大。(3) 普通振动台试验方法。用此方法研究土工问题时, 由于不能满足模型与原型应力、应变相同的要求, 使得该法得出的结果与实际相差甚远, 难以在岩土工程领域应用。由于离心机振动台能够真实模拟原型应力场中的应力条件, 能够精确再现原型在实际应力条件下的真实动力响应, 因此, 动力离心模型试验技术被公认为是研究岩土工程地震问题最有效、最先进的研究方法和试验技术^[2]。在过去的 20 多年里, 土工离心机振动台已经作为强大的技术手段用于模拟地基及土工结构物的地震动力反应, 离心机振动台技术和土工动力离心模型试验研究都得到了较快发展。

2 土工离心机振动台系统的发展

2.1 国外土工离心机振动台系统的发展

振动台系统以激振方式的不同来区分, 主要有机械振动台系统、爆炸振动台系统、压电式振动台系统、电磁振动台系统和电液振动台系统。

机械振动台系统是最早期的振动台系统, 其优点是制造简单, 维护方便, 能产生一定频率范围的正弦波输入, 而且操作方便, 成本较低。机械振动台系统又包括: 扳机弹簧振动台系统^[3]、颠簸道路式振动台系统^[4]、凸轮-杆式振动台系统^[5]。

爆炸振动台系统^[6]的工作原理是炸药爆炸释放的能量激发模型振动。该系统结构简单, 成本较低, 爆炸的能量大, 可以激振较大的模型, 但重复性差, 难以精确控制, 在一般的实验室中不易实现。

压电式振动台系统^[7]的工作原理是给压电陶瓷元件提供一个电场使之产生期望的变形, 晶片的应变变量直接与通过晶片表面的电场量级成比例。该振

动台系统最大优点是能产生随机振动, 缺点是压电材料产生的能量是有限的, 所以只能进行小质量的动力模型试验。

电磁振动台系统^[8]的工作原理是通过通交流电的线圈极性的变化, 使得两个线圈产生吸引和排斥, 从而带动振动台面和模型箱的振动。该振动台系统的优点是结构简单, 便于操作和维护, 同时能够提供较宽的频域和较大的振动力; 缺点是结构庞大, 能产生的最大加速度较小, 当交流电较大时会干扰测试数据产生干扰。

电液振动台系统^[9]的工作原理是通过液压缸活塞的竖直运动, 带动连杆机构沿水平方向推动振动台面对弹簧进行预压缩, 然后由弹簧带动振动台面和土样模型振动。随后, T. Kimura 等^[10]进一步发展了该振动台系统。由于电液伺服振动台系统采用液压伺服自动控制, 能自动、精确地采集试验数据, 同时又能精确再现地震波波型, 能施加大的有效荷载, 可以进行无限次地震模拟等, 在随后的 20 多年里, 该振动台系统得到了广泛的发展。如美国科罗拉多大学^[11]、荷兰代夫特土工技术研究所^[12]、日本 Taisei 公司^[13]、新加坡国立大学^[14]、德国鲁尔大学^[15]、英国威尔士大学^[16]等都建立了自己的电液伺服振动台系统, 其中以美国和日本的振动台数目最多。

电液振动台系统的发展, 已经从最初的水平线性振动, 发展到水平双向振动(如美国伦斯勒技术学院的土工离心机振动台系统^[17])和能在水平与垂直两个方向同时振动的水平-垂直二维振动台(如日本东京工业大学的土工离心机振动台系统^[18])。

2.2 国内土工离心机振动台系统的发展

土工离心机振动台系统在中国的发展相对较晚。已建成离心机振动台系统的单位有: 香港科技大学^[19]、南京水利科学研究院^[20]和清华大学^[21]。3 台土工离心机振动台系统的主要技术指标如表 1 所示。香港科技大学的离心机振动台系统的优点是既可以水平单向振动又可以在水平面的两个方向上同时振动。南京水利科学研究院的离心机振动台系统的优点是允许的离心机运行最大加速度较高(100 g)。而清华大学的离心机振动台系统的优点是振动历时长、振幅大, 能够模拟正弦波和任意地震波形。

关于土工离心机振动台系统发展的详细介绍

表 1 离心机振动台系统的主要技术指标
Table 1 Main technique indexes of shaking table in centrifuge

研制单位	离心机运行最大加速度/g	振动方向	最大水平振动加速度/g	激振力/kN	振动质量/kg	振动频率/Hz	最大振幅/mm	最长振动时间/s	振动台面尺寸/(cm×cm)
香港科技大学	75	水平双向	40	35	300	0~350	3.0	2	60×60
南京水利科学 研究院	100	单向	15	20	200	100	0.5	2	70×50
清华大学	50	单向	20	30	100	10~250	10.0	4	60×40

可参见有关研究^[22]。

3 模型箱的发展

静力离心模型试验中常用固壁式模型箱，如果在动力离心模型试验中也采用固壁式模型箱，在地震动的作用下，就会产生假性反射波，反射波在前、后两个固定边壁之间的往返传播会严重干扰真实地震波在土样中的传播。

20 世纪 80 年代初期，许多动力离心模型试验已开始使用叠环式模型箱。第一个叠环式模型箱是由 R. V. Whitman 等^[23]研制而成，该模型箱是由实心铝环叠放在一起，每个铝环的外面涂上聚四氟乙烯，以减少环与环之间的摩擦力，因此可以模拟柔性边界条件。但该叠环式模型箱在用于动力离心模型试验时仍存在一些缺点。首先，摩擦力仍然存在，这势必在某种程度上扭曲试验结果；其次，圆柱型模型箱有一个光滑的表面，不能维持由于地震动产生的补偿剪应力，因而不能反应真实的应力场情况；第三，这种模型箱的圆柱形状和相对大的高宽比(300 mm : 300 mm)会出现难以分析的三维问题。

为了克服入射波在固定边壁间的反射，C. J. Coe 等^[24]在 1985 年引入了“吸收边界”的概念，提出了在模型箱端部使用一种称作 duxseal 的工业填料来吸收由于模型箱端部产生的反射能。然而，K. L. Fishman 等^[25]研究发现，duxseal 边界仍然存在一些缺点。首先，该材质的物理特性难以标定，尤其是在高应力的离心模型试验中，其强度和模量很难测定，因此，很难得到土样和 duxseal 之间剪切应力的增长情况。其次，很难找到与这种材料边界一致的数学模型，因而很难对模型试验进行反分析。另外，由于该材料相对较软，在离心机运行过程中产生的侧向土压力会导致材料产生侧向变形，不能很好地满足零水平应变的条件。

为了在离心机上测得砂土的液化现象，B. Hushmand 等^[26]于 1988 年精心设计了一个更为复杂

的叠片式模型箱，1995 年 P. A. Van Laak 等^[27]进一步发展了这种叠片式模型箱。该叠片式模型箱由矩形框架堆叠而成，每层矩形框架之间用轴承连接，目的是为了减小框架之间的摩擦力，以达到和液化砂层的低强度相接近的目的。另外，两层框架之间允许的大位移滑动与饱和砂土的液化发展相适应。从使用这种模型箱所获得的离心模型试验数据来看，这种柔性边界能够很好地满足要求，同时，也和砂土的液化特性相吻合。

1996 年，X. Zeng 和 A. N. Schofield^[28]为了研究饱和土层在遭遇小地震时不完全液化的问题，研制出等效剪切梁模型箱。该模型箱是由铝合金框架和乳胶层交替叠加而成，乳胶层的厚度和强度根据试验所用土样的强度来设计，以确保模型箱的强度和土样的动强度接近。为了维持由于基础振动在每个端壁所引起的补偿剪应力，模型箱端壁内侧附有弹性的、不可伸展的铝片，铝片内侧面粘以砂粒使其具有摩擦性能。然而，由于地震过程中模型箱端壁的强度固定，而土的强度随土的孔隙率、有效应力和剪切应变而变化，很难使模型箱端壁的强度和土的强度一致。因此，这种等效剪切梁模型箱只能适用于土的强度在特定范围内变化的情况。

4 动力离心模型试验研究进展

4.1 动力离心模型试验研究概述

早在 1981 年，R. V. Whitman 等^[23]就进行了水平砂土地基动力响应的离心模型试验，使用的是叠环式模型箱。B. Hushmand 等^[26]于 1988 年进一步研究了一维土层的动力响应问题，使用的是叠片式模型箱。F. H. Lee 和 A. N. Schofield^[29]也于 1988 年进行了砂坝和人工砂岛的动力离心模型试验，使用的是固壁式模型箱。后来，随着 VELACS (verification of liquefaction analysis by centrifuge studies)^[30]项目的开展，又进行了一系列土工动力离心模型试验研究。表 2 分别从作者、研究概述和研

表 2 土工动力离心模型试验研究

Table 2 Studies of geotechnical dynamic centrifugal model test

作者	概述	评论/结论
R. V. Whitman 等 ^[23]	使用叠环式模型箱, 在 38 g 和 75 g 下模拟了一维砂土层的动力响应问题	可以在叠环式模型箱中进行一维土层的动力离心模型试验研究
B. Hushmand 等 ^[26]	第一次用矩形叠片式模型箱研究砂土液化, 50 g 和 75 g	叠片式模型箱用于研究一维地基问题要比固壁式模型箱优越
F. H. Lee 和 A. N. Schofield ^[29]	砂堤和砂岛, 固壁式模型箱, 40 g 和 80 g	地震强度超过 0.05 g 时, 主要是逐渐软化; 地震强度小于 0.05 g 时, 液化不可能发生; 砂的相对密度超过 80% 时, 液化的可能性减小
M. Heidari 和 R. G. James ^[31]	使用叠环式模型箱, 在 35 g 下模拟一维砂土层液化	当 GWT 在土表面时, 液化区域从表面向下发展, 当 GWT 在土面以下时, 液化从低于 GWT 的平面向两个方向发展
K. Arulanandan 等 ^[32]	地震诱发的流滑, 固壁式模型箱, 砂和黏土组成的二维模型	沉积的非均一性导致的流滑破坏
K. K. Muraleetharan 和 K. Arulanandan ^[33]	成层土坝的动力特性, 33.2 g 离心加速度, 15 g 正弦振动加速度	振动导致土的屈服和剪切强度减少, 初始应力状态影响孔压产生, 在靠近基础的土层运动最小
V. M. Taboada 和 R. Dobry ^[34]	饱和松散水平地基, 叠片式模型箱, 50 g, 0.235 g 峰值加速度, 正弦输入	两个相同的模型试验; 浅土部分, 超静孔压率高, 液化发生快; 多数竖向沉降位移在振动过程中发生; 液化导致加速度减少
V. M. Taboada 和 R. Dobry ^[35]	成层水平地基, 上层砂土下层淤泥, 叠片式模型箱, 50 g, 0.35 g 峰值加速度	提供试验数据
K. Adalier 和 A. W. Elgamal ^[36]	中间带有淤泥的砂堤浸没在水中的, 固壁式模型箱, 70 g	整个砂域孔压都有增长, 但淤泥心没有明显变化; 在地震过程中, 淤泥心没有损坏
H. Akamota 等 ^[37]	城市垃圾土地基的动力响应, 固壁式模型箱, 50 g, 再生土的抗震性能研究	表层硬土层有一些孔压的变化, 但是没有获得明确的变化规律
X. Zeng 和 K. Arulanandan ^[38]	研究带有一层薄砂的泥质斜坡的破坏机制, 固壁式模型箱, 50 g	砂中超静孔压的产生似乎会引起斜坡的侧向滑动
J. X. Niu 等 ^[39]	软黏土层和黏土与砂成层土的动力响应, 叠片式模型箱, 50 g, 降低砂的渗透性比尺	随着黏土层厚度的增加, 软黏土共振频率明显减小
N. K. Pilgrim ^[40]	研究表面倾斜砂基的变形, 固壁式模型箱, 80 g	倾斜角度大于 18°, 惯性加载控制着剪应变, 倾斜角度小于 6°, 则剪应变由瞬时增长的孔压控制
G. L. Fiegel 等 ^[41]	地震诱发的软黏土沉降, 铰链盒式模型箱, 50 g	表面沉降取决于振动强度和频率成分, 沉降发生在地震后超静孔压消散的过程中
P. J. Zhao ^[42]	软、硬黏土层和黏土与砂成层土的动力响应, 叠片式模型箱, 50 g, 降低砂的渗透性比尺	从软黏土的底部到顶层低频成分被放大, 硬黏土层没有表现出很强的非线性反应
M. R. Tufenkjian 和 M. Vucetic ^[43]	研究了强震作用下, 土钉支护的基坑的稳定性问题	土钉长度的增加能够明显增强土体的稳定性
C. J. Curras 等 ^[44]	进行群桩支撑结构的动力离心模型试验, 并以试验结果评价了 BNWF 动力分析方法	BNWF 动力分析方法适用于分析桩-土-结构系统的动力相互作用问题
M. M. Dewoolkar 等 ^[45]	检测坚固地基上悬臂式挡土墙支撑的墙后饱和可液化无黏性回填土的动力特性	试验结果表明, 作用在挡墙上的动推力与墙后填土的超孔隙水压力密切相关, 总动推力的作用点在离墙顶为 0.6~0.8 倍墙高位置处
Y. Yu 和 F. H. Lee ^[46]	软黏土层的动力响应, 叠片式模型箱, 50 g	研究了不同厚度的软黏土层在不同地震波作用下的动力响应
A. Yamaguchi 等 ^[47]	软黏土的硬度在强震作用下的动力响应, 及其上的回填土的液化的影响	由于软黏土不同固结度影响了土的硬度, 硬度不同对回填土地基的动力特性有非常明显的影响
H. I. Ling 等 ^[48]	研究大直径埋管在地基遭受地震液化后的抗漂浮稳定性问题, 叠片式模型箱, 30 g	使用砂砾和土工织物减轻管线漂浮, 试验测定了管线的上升、土压力反应、孔压的大小以及地面变形, 提出了抗管线漂浮的设计程序
H. M. Dief 和 J. L. Figueroa ^[49]	振动台校准和砂土液化研究, 60 g	对振动台进行校准, 并比较在相同动力离心模型试验中水和一定比例粘滞性流体中孔压的反应
H. I. Ling 等 ^[50]	分析土工织物加筋挡土墙的动力特性, 频率 2 Hz, 振幅 0.2 g 的正弦波激励	测定了墙后填土的加速度反应, 土工格栅土层的应变和土表面变形, 并和计算结果进行比较, 计算和试验结果吻合
T. Kagawa 等 ^[51]	比较土-桩-结构物的土工动力离心模型试验结果和大比尺振动台试验结果	精细的动力离心模型试验结果能复制大比尺振动台试验结果的主要反应特性, 试验结果也发现了两种试验结果的异同
C. J. Lee ^[52]	模拟沉箱型码头墙在地震过程中的动力特性	墙体的转动主要由于深部土层超孔隙水压力和土压力的变化, 墙体的滑动主要由于中空部分土层这些压力的变化等
S. J. Brandenberg 等 ^[53]	研究单桩和群桩在可液化的均质土地基中的动力特性	桩相对于土的变形取决于不同土层作用的侧向荷载, 这又取决于土层的变形、桩基的刚度和不液化硬土层所施加荷载的大小等
J. Takemura 和 J. Izawa ^[54]	液压伺服驱动的水平-垂直二维振动台的测试及桩基液化研究	介绍了离心机振动台的模型试验结果, 并对桩基抗液化的有效排水措施进行了初步研究

研究成果等方面综述了部分土工动力离心模型试验研究。

从表 2 可以看出, 土工动力离心模型试验研究的内容越来越丰富, 研究的范围越来越广, 研究的深度也越来越深。研究的内容, 从水平地基的动力响应^[23]到砂土堤坝的动力稳定性^[29], 从桩土的相互作用^[51]到加筋土挡墙的动力稳定性^[50], 从单一土层动力问题^[31]到成层土的动力问题^[35], 从砂土地基的地震液化问题^[29]到黏性土层的动力响应问题^[42], 从一维土层的动力响应问题^[26]到二维边坡的动力稳定性^[32]等。研究的范围从最初的对单一土层的研究^[23]到现在研究边坡问题^[38], 各种结构物与土之间的动力相互作用问题^[44-51], 挡土墙的动力稳定性问题^[45], 研究城市垃圾土的动力特性问题^[37], 土钉支护的基坑稳定性问题^[43]等。研究的深度, 从最初的定性研究到现在的定量研究, 从最初的验证性研究到现在的设计性研究, 从最初研究单一土层的液化问题^[26]到现在研究群桩在液化土层中的稳定性问题^[53]和埋管在液化土层中的抗漂浮问题^[48]等。

4.2 离心模型试验中的比尺规则

为确保在尺寸减小的离心模型中土单元和原型土单元性状相似, 应力和应变相等, 试验测定的数据适用于原型, 原型和模型之间必须有一套相适应的比例缩放关系。有两种方法可以推导这种比尺关系, 一种是量纲分析方法^[55], 另一种方法是根据作用在两种状态土单元上的力的平衡方程来推导^[56]。C. F. Leung 等^[57]总结了一套常用的比尺关系, 如表 3 所示。

从表 3 中可以看出, 对于多数静、动力情况, 这些比尺关系是协调的。然而, 有些情况下这种比尺关系是不协调的, 比如, 时间比尺规则对于动力作用和渗流(或固结)过程就分别有两种不同的关系。对于动力作用, 协调的时间比尺关系应该为模型中的时间是原型时间的 $1/N$ 倍。而固结过程中的比尺规则为模型中的时间是原型时间的 $1/N^2$ 倍。因此, 如果模型中的流体仍然使用水, 那么在动力激励的饱和砂基中, 孔压消散率将会超过孔压产生率。试验中, 如果模型砂中的流体使用水, 由于消散速度太快, 在动力激励过程中, 很小或根本观测不到孔压的增长。另一方面, 如果采用模型作用是原型时间的 $1/N^2$ 倍, 模态效应就会被扩大。有两种方法可以解决这种不协调的比尺关系。一种

表 3 土工离心模型试验中的比尺关系

Table 3 Scale law in centrifugal model test

参数	原型	N-g 离心模型
线性尺寸	1	$1/N$
面积	1	$1/N^2$
体积	1	$1/N^3$
质量	1	$1/N^3$
频率	1	N
加速度	1	N
速度	1	1
位移	1	$1/N$
应变	1	1
能量	1	$1/N^3$
应力	1	1
力	1	$1/N^2$
时间(黏滞流)	1	1
时间(动力)	1	$1/N$
时间(渗流)	1	$1/N^2$

方法是在模型中使用黏滞性是水的 N 倍的孔隙流体^[58-59], 或者是在模型土样中使用一种精炼油代替原型中的水作为孔隙流体, 以减小模型的渗透性。第二种方法是依靠使用石英粉和细砂的混合体来减小模型砂的渗透性, 以达到 $1/N$ 倍原型砂渗透性的目的, 这里假定混合砂的应力 - 应变关系和要模拟的原始砂材料的应力 - 应变关系相同。当土样模型中既有砂土又有黏土时, 这是一种更为实用的方法, 因为硅油不能使用在黏性土中^[60]。

5 结 语

动力离心模型试验的优越性使得离心机振动台在岩土工程界得到广泛应用, 已经成为研究岩土工程地震动力问题最为先进的试验技术和研究方法。但无论是离心机振动台系统的发展, 振动台模型箱的发展还是土工动力离心模型试验的研究都主要集中在欧美、日本等一些发达国家。尽管香港科技大学、南京水利科学研究所和清华大学也相继发展了离心机振动台系统, 但土工动力离心模型试验在中国的发展还处于起步阶段, 研究方法和研究内容还需要不断探索。

参考文献(References):

- [1] Taylor R N. Geotechnical Centrifuge Technology[M]. Glasgow, UK: Blackie Academic and Professional, 1995. 168 - 169.
- [2] 王年香, 章为民. 混凝土面板堆石坝动态离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 504 - 507.(Wang Nianxiang, Zhang Weimin. Dynamic centrifuge model test for concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 504 - 507.(in Chinese))
- [3] Bolton M D, Steedman R S. Centrifuge testing of microconcrete retaining walls subjected to base shaking[A]. In: Proceedings of the International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1982. 311 - 330.
- [4] Kutter B L. Deformation of centrifuge models of clay embankments due to "bumpy road" earthquakes[A]. In: Proceedings of the International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1982. 331 - 349.
- [5] Kimura T, Takemura J, Saitoh K. Development of a simple mechanical shaker using a cam shaft[A]. In: Proc. of Centrifuge'88[C]. Paris, France: A. A. Balkema, 1988. 107 - 110.
- [6] Zelikson A, Leguay P, Pascal C. Centrifugal model comparison of pile and raft foundations subjected to earthquakes[A]. In: Proceedings of the International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1982. 283 - 289.
- [7] Arulanandan K, Canclini J, Anandarajah A. Simulation of earthquake motions in the centrifuge[J]. Journal of the Geotechnical Division, ASCE, 1982, 108(5): 730 - 742.
- [8] Fujii N. Development of an electromagnetic centrifuge earthquake simulator[A]. In: Proc. of Centrifuge'91[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1991. 351 - 354.
- [9] Ortiz L. A, Scott R F, Lee J. Dynamic centrifuge testing of a cantilever retaining wall[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1983, 11: 251 - 268.
- [10] Kimura T, Takemura J, Saitoh K. Development of an electro-hydraulic centrifuge earthquake simulator[A]. In: Proc. of Centrifuge'88[C]. Paris, France: A. A. Balkema, 1988. 103 - 106.
- [11] Ketchman S A, Ko H Y, Sture S. Performance of an earthquake motion simulator for a small geotechnical centrifuge[A]. In: Proc. of Centrifuge'91[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1991. 361 - 368.
- [12] Hjortnaes-Pedersen A G I, Nelissen H A M. Applications of hydraulic actuators in the Delft geotechnics centrifuge[A]. In: Proc. of Centrifuge'91[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1991. 385 - 390.
- [13] Nagura K, Tanaka M, Kawasaki, K, et al. Development of an earthquake simulator for the TAISEI centrifuge[A]. In: Proc. of Centrifuge'94[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994. 151 - 156.
- [14] Ng T G, Lee F H, Liaw C Y, et al. Development of a dynamic loading device for model foundations[A]. In: Proc. of Centrifuge'94[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994. 183 - 188.
- [15] Laue J, Jessberger H L. Behavior of foundation systems in sand with dynamic sinusoidal loadings[A]. In: Proc. of Centrifuge'94[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994. 265 - 270.
- [16] Davies M C R. Dynamic soil structure interaction resulting from blast loading[A]. In: Proc. of Centrifuge'94[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994. 319 - 324.
- [17] Van Laak P A, Adalier K, Dobry R, et al. Design of RPI's large servo-hydraulic centrifuge shaker[A]. In: Kimura T, Kusakabe O, Takemura J ed. Proc. of Centrifuge'98[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1998. 105 - 110.
- [18] Takemura J, Takahashi A, Aoki Y. Development of horizontal-vertical 2D shaker in a centrifuge[A]. In: Phillips R, Guo P J, Popescu R ed. Physical Modeling in Geotechnics: ICPMG'02[C]. [s. l.]: [s. n.], 2002. 163 - 168.
- [19] Shen C K, Li X S, Ng C W W, et al. Development of geotechnical centrifuge in Hong Kong[A]. In: Kimura T, Kusakabe O, Takemura J ed. Proc. of Centrifuge'98[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1998. 13 - 18.
- [20] 章为民, 赖忠中, 徐光明. 电液式土工离心机振动台的研制[J]. 水利水电工程学报, 2002, (1): 63 - 66.(Zhang Weimin, Lai Zhongzhong, Xu Guangming. Development of an electro-hydraulic shake table for the centrifuge[J]. Hydro-science and Engineering, 2002, (1): 63 - 66.(in Chinese))
- [21] 张建民, 于玉贞, 濮家骊, 等. 电液伺服控制离心机振动台系统研制[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 843 - 845.(Zhang Jianmin, Yu Yuzhen, Pu Jialiu, et al. Development of a shaking table in electro-hydraulic servo-control centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 843 - 845.(in Chinese))
- [22] 于玉贞, 陈正发. 土工离心机振动台系统的发展研究[J]. 水利水电技术, 2005, 36(5): 19 - 21.(Yu Yuzhen, Chen Zhengfa. A review on development of shaking table system for geotechnical centrifuge[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(5): 19 - 21.(in Chinese))
- [23] Whitman R V, Lambe P C, Kutter B L. Initial results from a stacked ring apparatus for simulation of a soil profile[A]. In: Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical

- Earthquake Engineering and Soil Dynamics[C]. St. Louis, USA: [s. n.], 1981. 1105 - 1110.
- [24] Coe C J, Prevost J H, Scanlan R H. Dynamic stress waves reflection/attenuation : earthquake simulation in centrifuge soil model[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1985, 13: 109 - 128.
- [25] Fishman K L, Mander J B, Richards R. Laboratory study on seismic free field response of sand[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1995, 14(1): 33 - 43.
- [26] Hushmand B, Scott R F, Crouse C B. Centrifuge liquefaction tests in a laminar box[J]. *Geotechnique*, 1988, 38(2): 253 - 262.
- [27] Van Laak P A, Taboada V M, Dobry R, et al. Earthquake centrifuge modeling using a laminar box[A]. In : *Dynamic Geotechnical Testing*[C]. [s. l.]: [s. n.], 1994. 370 - 384.
- [28] Zeng X, Schofield A N. Design and performance of an equivalent-shear-beam container for earthquake centrifuge modeling[J]. *Geotechnique*, 1996, 46(1): 83 - 102.
- [29] Lee F H, Schofield A N. Centrifuge modeling of sand embankment and islands in earthquakes[J]. *Geotechnique*, 1988, 38(1): 48 - 58.
- [30] Arulanandan K, Scott R F. Project VELACS — control test results[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, 1993, 119(8): 1276 - 1292.
- [31] Heidari M, James R G. Centrifuge modeling of earthquake induced liquefaction in a column of sand[A]. In : *Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1982. 271 - 281.
- [32] Arulanandan K, Yogachandran C, Muraleetharan K K, et al. Seismically induced flow slide on the centrifuge[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, 1988, 114(12): 1442 - 1449.
- [33] Muraleetharan K K, Arulanandan K. Dynamic behavior of earth dams containing stratified soils[A]. In : *Proc. of Centrifuge'91*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1991. 401 - 408.
- [34] Taboada V M, Dobry R. Experimental results of model No.1 at RPI[A]. In: Arulanandan K, Scott R F ed. *Proceedings of the International Conference on Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993. 3 - 17.
- [35] Taboada V M, Dobry R. Experimental results of model No. 4a at RPI[A]. In: Arulanandan K, Scott R F ed. *Proceedings of the International Conference on Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993. 611 - 621.
- [36] Adalier K, Elgaml A W. Experimental results of model No. 7 at RPI[A]. In: Arulanandan K, Scott R F ed. *Proceedings of the International Conference on Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993. 799 - 808.
- [37] Akamota H, Miyake M, Wada M, et al. Liquefaction of the ground reclaimed by urban refuse ash[A]. In: *Proc. of Centrifuge'94*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994. 251 - 255.
- [38] Zeng X, Arulanandan K. Modeling lateral sliding of slope due to liquefaction of sand layer[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121(11): 814 - 816.
- [39] Niu J X, Lee F H, Tan T S. Development and performance of a Laminar box for seismic centrifuge tests[A]. In: *Proceedings of the 3rd Asian Young Geotechnical Engineers Conference*[C]. Singapore: [s. n.], 1997. 517 - 526.
- [40] Pilgrim N K. Earthquake-related deformation beneath gently inclined ground[J]. *Geotechnique*, 1998, 48(2): 187 - 199.
- [41] Fiegel G L, Kutter B L, Idriss I M. Earthquake-induced settlement of soft clay[A]. In: Kimura T, Kusakabe O, Takemura J ed. *Proc. of Centrifuge'98*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1998. 231 - 236.
- [42] Zhao P J. Centrifuge modeling of seismic amplification in some Singapore soil conditions[M. S. Thesis][D]. Singapore: National University of Singapore, 1999.
- [43] Tufenkjian R M, Vucetic M. Dynamic failure mechanism of soil-nailed excavation models in centrifuge[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(3): 227 - 235.
- [44] Curras C J, Boulanger R W, Kutter B L, et al. Dynamic experiments and analyses of a pile-group-supported structure[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(7): 585 - 596.
- [45] Dewoolkar M M, Ko H Y, Park R Y S. Seismic behavior of cantilever retaining walls with liquefiable backfills[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(5): 424 - 435.
- [46] Yu Y, Lee F H. Seismic response of soft ground[A]. In: Phillips R, Guo P J, Popescu R ed. *Physical Modeling in Geotechnics: ICMG'02*[C]. Newfoundland, Canada: A. A. Balkema, 2002. 519 - 524.
- [47] Yamaguchi A, Kazama M, Toyota H, et al. Effects of the stiffness of soft clay layer on strong motion response[J]. *Soils and Foundations*, 2002, 42(1): 17 - 34.
- [48] Ling H I, Mohri Y, Kawabata T, et al. Centrifugal modeling of seismic behavior of large-diameter pipe in liquefiable soil[J]. *Journal*

- of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(2): 1 092 - 1 101.
- [49] Dief H M, Figueroa J L. Shake table calibration and specimen preparation for liquefaction studies in the centrifuge[J]. Geotechnical Testing Journal, 2003, 26(4): 402 - 409.
- [50] Ling H I, Liu H, Kaliakin V N, et al. Analyzing dynamic behavior of geosynthetic-reinforced soil retaining walls[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(8): 911 - 920.
- [51] Kagawa T, Sato M, Minowa C, et al. Centrifuge simulations of large-scale shaking table tests: case studies[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(7): 663 - 672.
- [52] Lee C J. Centrifuge modeling of the behavior of caisson-type quay walls during earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(2): 117 - 131.
- [53] Brandenburg S J, Boulanger R W, Kutter B L, et al. Behavior of pile foundations in laterally spreading ground during centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(11): 1 378 - 1 391.
- [54] Takemura J, Izawa J. Horizontal-vertical two-dimensional shaker in a centrifuge[A]. In : Seismic Performance and Simulation of Pile Foundations in Liquefied and Laterally Spreading Ground[C]. [s. l.]: [s. n.], 2006. 268 - 281.
- [55] Hoek E. The design of a centrifuge for the simulation of gravitational fields in mine models[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1965, 65: 455 - 487.
- [56] Roscoe K H. Soils and models tests[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1968, 3(5): 57 - 64.
- [57] Leung C F, Lee F H, Tan T S. Principles and applications of geotechnical centrifuge model testing[J]. Journal of the Institution of Engineers, Singapore, 1991, 31(7): 39 - 45.
- [58] Lee F H. Centrifuge modeling of earthquake effects on sand embankments and islands[Ph. D. Thesis][D]. Cambridge, UK: Cambridge University, 1985.
- [59] Kamon M, Mimura M, Matsuda S, et al. Experimental studies on the seismic response of a gravity caisson quay wall[A]. In: Kimura T, Kusakabe O, Takemura J ed. Proc. of Centrifuge'98[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1998. 333 - 338.
- [60] Kutter B L, James R G. Dynamic centrifuge model tests on clay embankments[J]. Geotechnique, 1989, 39(1): 91 - 106.