

DOI: 10.11779/CJGE2020S2013

NS-2 型水平单向离心机振动台研制及性能验证

顾行文, 任国峰*, 王年香, 徐光明

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 基于土工离心机振动台系统的动力离心模型试验技术是公认的研究岩土工程地震问题最为有效、最为先进的研究方法和试验技术, 其原理在于通过土工离心机的高速旋转, 恢复与原型相同的自重应力水平, 然后借助于离心机振动台系统再现原型在实际应力条件下的真实动力反应。为此, 主要介绍了南京水利科学研究院研制成功的 NS-2 型离心机振动台系统设计关键技术和性能指标, 可在 80g 重力加速度下开展有效负重小于 500 kg 水平单向地震动响应模拟。通过某沥青混凝土心墙砂砾石坝动态离心模型试验, 初步验证了离心机振动台系统性能指标, 完全满足工程实际需要。

关键词: 离心机; 振动台; 性能评价; 模型试验

中图分类号: TU411.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0072-05

作者简介: 顾行文(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事土工静动力离心模型试验研究。E-mail: xwgu@nhri.cn。

Development and performance tests on NS-2 horizontal unidirectional centrifugal shaker

GU Xing-wen, REN Guo-feng, WANG Nian-xiang, XU Guang-ming

(Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The dynamic centrifuge model test technology based on the geo-centrifugal shaking table system is the most effective and advanced research method and test technology for geotechnical engineering seismic problems. The principle is that the real dynamic response of the prototype under the actual stress condition can be reproduced by means of the centrifugal shaking table system installed on the centrifuge, which is used to restore the same stress level with the prototype. The key design technology and performance index of the NS-2 centrifugal shaker system are mainly introduced, which can simulate the horizontal unidirectional seismic response with effective load less than 500 kg under 80g. The performance index of the centrifugal shaker system is preliminarily verified by the dynamic centrifugal model tests on a rockfill dam with asphalt concrete core, which completely meets the practical needs of the project.

Key words: centrifuge; shaking table; performance evaluation; model test

0 引言

中国属多震国家, 很多大型水利工程兴建在强震地区, 在地震作用下, 它们可能发生裂隙、下沉、坍塌甚至破坏, 不仅将对工程本身造成损失, 而且会带来巨大的次生灾害, 后果十分严重, 因此, 有关地震方面的研究历来受到重视。

分析表明, 目前研究地震破坏的方法大致可分为 3 类: 一是数值模拟, 其计算结果受计算参数和本构数学模型的影响很大; 二是现场灾后调查, 通过对地震现场破坏现象的调查, 研究分析地震的破坏机理及抗震措施, 由于实际地震的时空不确定性和复杂性, 这类研究比较表观, 不能重复, 且无法取得地震全过程实测资料与数值分析结果进行相互验证; 三是振动台试验方法, 常规地面上的振动台模型试验由于无法模拟岩土材料的重力作用, 因此多用于刚性材料的结

构试验, 而采用离心机振动台, 则可以在原型应力条件下, 在模型底部产生可控制的地震波, 从而可以通过各种监测手段直接获得地震引起的岩土结构物的动力变形和稳定特性。因此土工离心机振动台被国内外岩土工程界认为是最有效的地震模拟试验手段, 通过与数值模拟分析相互补充和验证, 可以提高土工抗震研究水平, 解决相关的岩土工程抗震问题^[1-6]。

鉴于离心机振动台在抗震研究方面的突出优势, 南京水利科学研究院在 2002 年自行研制了中国第一台 NS-1 型电液式土工离心机振动台^[7], 并利用该振动

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2017YFC0404905); 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室开放基金项目 (2019D23); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (Y319001, Y319002)

收稿日期: 2020-08-07

*通信作者 (E-mail: gfren@nhri.cn)

台研究了某混凝土面板堆石坝体的地震加速度反应特性、面板应变反应特性、坝体的变形特性等^[4]。试验结果表明, 该离心机振动台能满足岩土工程地震问题研究的要求, 提供了一个非常有效的研究手段, 可在工程实际中大力推广应用。

为了更好地满足科研和工程需要, 南京水利科学研究院在此基础上研制了性能更可靠、技术指标更先进的 NS-2 型离心机振动台系统。本文主要介绍了该设备的设计关键技术和性能指标, 给出其主要功能特点和技术参数。通过开展某沥青混凝土心墙砂砾石坝动态离心模型试验, 初步验证了离心机振动台系统性能指标。

1 离心机振动台系统概况

1.1 系统总体结构

NS-2 型离心机振动台是由南京水利科学研究院和中国工程物理研究院联合研制, 采用电液伺服液压驱动, 实现水平单向振动(垂直于离心机转臂), 如图 1 所示。主要由机械系统、液压系统、伺服控制系统、动态数据采集系统及离心模型试验辅助设备等组成, 其中液压系统是系统的动力机构, 机械系统提供负载运动支承以及试验体安放平台, 伺服控制系统完成地震波形的模拟加载控制, 系统组成如图 2 所示。

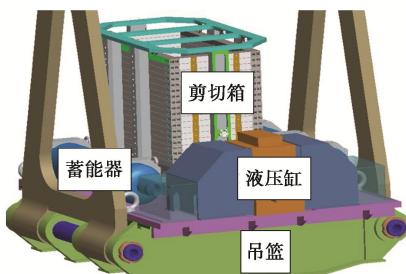


图 1 离心机振动台示意

Fig. 1 Sketch of centrifuge shaking table

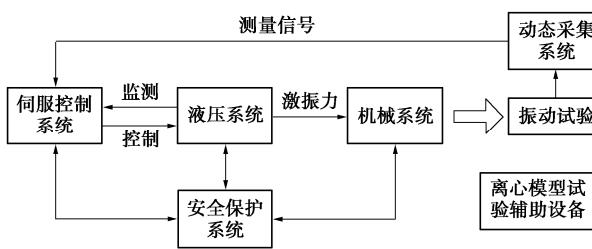


图 2 离心机振动台组成

Fig. 2 Components of centrifuge shaking table

1.2 主要技术参数

根据离心机振动台模型试验研究的国内现状和所配置的土工离心机运行情况, 同时考虑到土木和水利工程的实际情况, 设计采用如下技术参数:

- a) 振动方向: 一维水平振动(垂臂向);

- b) 驱动方式: 液压(蓄能器)驱动;
- c) 最大振动加速度: $a_{\max}=20g$; 最大速度: $V_{\max}=0.5 \text{ m/s}$; 最大振动幅值: $A_{\max}=5 \text{ mm}$;
- d) 最大振动时间: 3 s
- e) 频率范围: 20~200 Hz;
- f) 最大有效负载(含模型箱、模型、以及其它辅助装备): $M_{\max}=500 \text{ kg}$;
- g) 振动台控制: 利用以太网通过滑环实现通讯;
- h) 激振波形: 地震波、随机波;
- i) 最大离心加速度: 80g。

2 主要部件的结构

2.1 机械系统

机械结构包括: 滚柱导轨、振动台面、剪切模型箱、以及激振系统安装底板。

安装底板作为激振系统的安装基础, 向下连接离心机吊篮、向上固定系统结构; 滚柱导轨作为运动支承安装在底板上; 振动台面通过滑块安装在滚柱导轨上, 模型及模型箱作为振动负载安装在振动台面上。

2.2 液压系统

液压系统包括: 伺服液压缸一套、蓄能器组一套、21 MPa 油源、以及离心机上的供油系统等。

液压缸安装在吊篮底板中轴线上, 背负一台 MOOG 电液伺服阀为液压缸供油; 在吊篮内布置一组小容量蓄能器作为伺服阀的进、回油及供油稳压配套设备, 在离心机大臂上布置一组大容量蓄能器作为激振系统主油路的供油设备, 重新配置 21 MPa 油源。如图 3 所示。

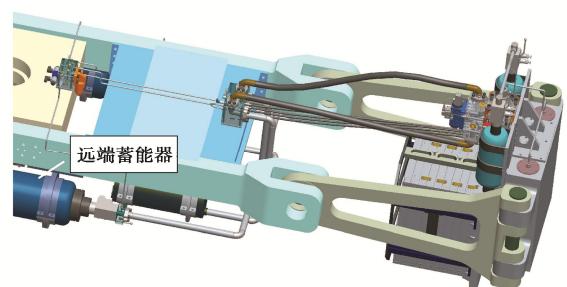


图 3 离心机振动台管路系统

Fig. 3 Piping of centrifuge shaking table

2.3 伺服控制系统

伺服控制系统包括: 伺服驱动系统、上位控制系统、数据测量采集系统。伺服驱动系统布置在离心机上仪器仓内, 包括伺服驱动器、运动控制器以及配套的供电设备, 实现伺服液压缸的位移跟随控制, 具有预设凸轮曲线跟踪、自动调零、自动标定等功能; 上位控制系统放置在实验控制间, 安装有地震波形再现

软件一套，实现地震波加速度振动波形的信号处理、地震波响应测量及控制，并具有试验数据和试验曲线的实时测量、屏显、存储、数据管理等功能，如图 4；试验数据测量采集系统由传感器及信号采集设备组成，为伺服控制、安全保护、试验数据分析提供支持。

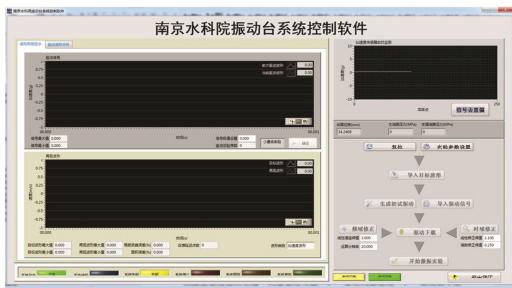


图 4 波形控制系统

Fig. 4 Waveform control system

3 性能评价

3.1 试验介绍

在南京水利科学研究院 NHRI400 g·t 大型土工离心机和 NS-2 型离心机振动台上开展某沥青混凝土心墙砂砾石坝的动态离心模型试验，限于篇幅，这里只介绍坝体模型试验的部分结果。振动台和离心机总体布置见图 5。

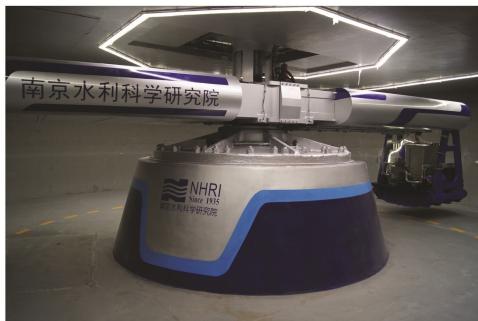


图 5 总体布置图

Fig. 5 General layout

从目前来看即使用世界最大的离心机要等比尺模拟全部的坝体仍然是不可能的，因此，本项研究采用不等比尺的离心模型试验方法，即模型几何比尺 η_l 小于加速度比尺的倒数 $1/\eta_g$ ，振动台模型箱净尺寸为 700 mm×350 mm×650 mm（长×宽×高）。模型设计时取大坝标准剖面，按平面问题进行试验。模拟范围：竖向从建基面 2176 m 高程到坝顶 2304.5 m 高程，即整个坝高 128.50 m，顺河向取坝轴线上游 160 m、下游 155 m，共 315 m 宽。标准剖面的上游坝坡为 1:2.75~1:2.25，下游坝坡为 1:1.8~1:1.6；而模型模拟范围内上游坝坡为 1:2.75~1:2.5，下游坝坡为 1:1.8~1:1.7，不考虑马道和上坝公路，试验将上、

下游坝坡简化成同一坡度，上游坝坡取 1:2.75，下游坝坡取 1:2.6。模型几何比尺 $\eta_l = 1:450$ ，离心加速度比尺 $\eta_g = 40$ 。模型布置见图 6。

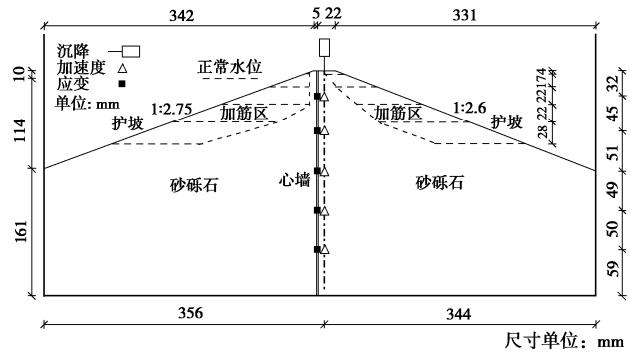


图 6 模型试验布置图

Fig. 6 Layout of model tests

本次试验输入波形为实际地震波，地震峰值加速度有 2 个：设计地震波 516.5g（50 a 超越概率 2% 场地波），对应无抗震措施模型 M1 和有抗震措施模型 M3；校核地震波 643.3g（100 年超越概率 2% 场地波），对应无抗震措施模型 M2 和有抗震措施模型 M4。模型试验所需筑坝材料取自现场，根据以往粒径效应研究成果，模型土料的限制粒径应小于土作用构件最小边长的 1/15~1/30，原型砂砾石料的最大粒径为 300 mm，离心振动台模型砂砾石料的限制粒径取为 20 mm，存在一个对超粒径颗粒进行处理的问题。依据《水电水利工程粗粒土试验规程》DL/T5356—2006，把原级配缩制成试验级配最常用的有相似级配法和等量替代法。根据现场检测级配曲线，用相似级配法与等量替代法相结合的方法确定砂砾石料的试验级配，如图 7 所示，其不均匀系数和曲率系数与现场料相近。沥青砼心墙采用有机玻璃板模拟，心墙厚度按抗弯刚度相似条件确定；模型护坡采用 1~2 mm 厚的砼，由于厚度较薄，不会影响坝体的变形或破坏；有抗震措施是指在筑坝材料区域铺设土工格栅，土工格栅采用纱窗模拟，抗拉强度要求满足相似条件，为了模拟实际工程中筑坝材料嵌入格栅的情形，模型格栅在铺设前，需要在上下面各刷一层胶，使其能够粘合少量的堆石料，从而可以模拟筑坝材料嵌入格栅的效果。

为了量测坝体地震加速度反应，在坝轴线上沿高程 2202.4, 2224.8, 2246.9, 2269.8, 2290.1 m 共布置 5 个加速度计，同时在坝顶布置 1 个激光位移传感器，测试坝体地震震陷。

3.2 结果分析

以下给出的所有试验结果均已根据模型相似律换算至原型。

（1）无抗震措施模型试验

a) 坝体加速度反应

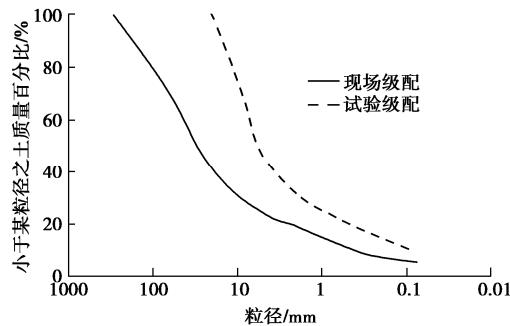


图 7 砂砾石料颗粒级配曲线

Fig. 7 Grain-size distribution curves of gravel

图 8 和图 9 分别给出了模型 M1 和 M2 对应的建基面原型场地波和试验实际输入波时程线, 前者目标波峰值分别为 $504.514g$ 和 $-510.21g$, 输入波峰值分别是 $501.937g$ 和 $-523.127g$; 后者目标波峰值分别为 $645.023g$ 和 $-644.977g$, 输入波峰值分别是 $646.388g$ 和 $-649.306g$, 从中可以看出, 波形的频响特性较为吻合, 试验输入波形较好地再现了目标场地波。

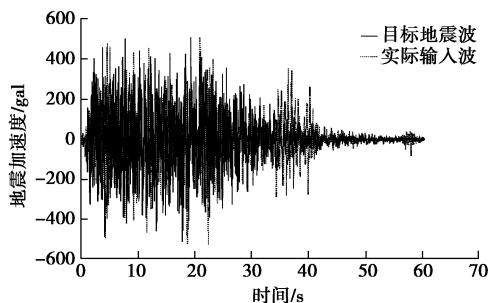


图 8 模型 M1 目标地震波和实际输入波时程曲线

Fig. 8 Time histories of target seismic waves and actual input waves for model M1

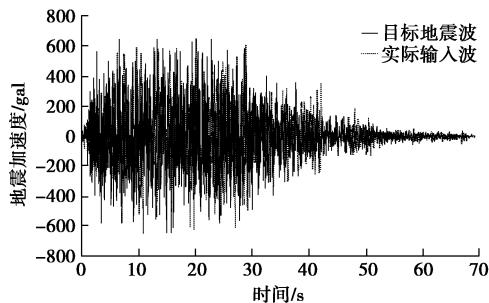


图 9 模型 M2 目标地震波和实际输入波时程曲线

Fig. 9 Time histories of target seismic waves and actual input waves for model M2

图 10 给出了无抗震措施情况下坝体在 2 种场地波条件下的最大加速度和放大系数随坝高的变化。

由此可知: ①在基岩输入地震加速度的作用下, 坝体地震加速度反应随着高程的增加而相应增大, 呈现出明显的放大效应; ②坝体加速度反应随坝高的变化可以按约 $2/3$ 坝高为界, 大致分成两个线性变化段,

上部的加速度放大效应强于下部; ③随着基岩输入地震加速度的增加, 坝体加速度放大系数总体上略有减小; ④无抗震措施情况下坝体坝顶地震加速度放大系数约为 $2.7\sim 3.0$ 。

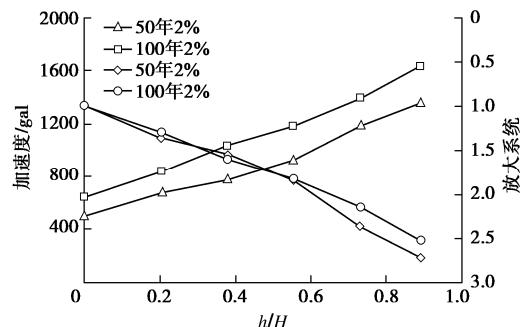


图 10 坝体坝轴线最大加速度和放大系数沿坝高分布

Fig. 10 Distribution of maximum acceleration and amplification coefficient of acceleration along dam height
b) 坝体破坏模式

图 11 和图 12 分别表示无抗震措施情况坝体在设计地震波作用下 (M1) 和校核地震波作用下 (M2) 的破坏情况。



图 11 M1 坝体破坏

Fig. 11 Dam failure of M1



图 12 M2 坝体破坏

Fig. 12 Dam failure of M2

从上述试验照片可以看出: ①无抗震措施情况坝体在设计地震波条件下, 下游未发现明显破坏, 上游出现了一定程度的坝体破坏; 在蓄水位处可见明显的护坡开裂; ②无抗震措施情况坝体在校核地震波条件下, 下游未发现明显破坏, 上游出现了较大程度的坝体破坏; 在蓄水位处和坝顶处均有明显的护坡开裂。

(2) 有抗震措施模型试验

图 13, 14 分别给出了 2 种场地波条件下有抗震措施和无抗震措施坝体的最大加速度和放大系数随坝高的变化。

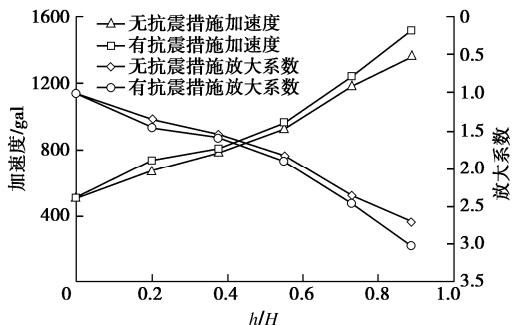


图 13 设计地震波作用下坝轴线加速度及放大系数分布

Fig. 13 Distribution of acceleration and amplification coefficient of acceleration under design seismic waves

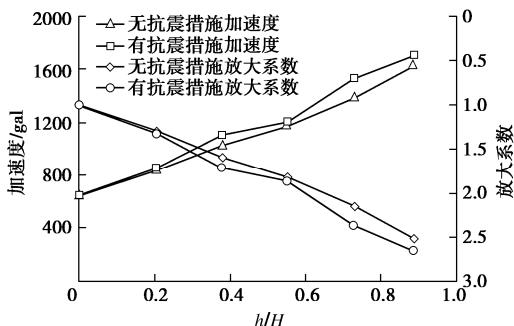


图 14 校核地震波作用下坝轴线加速度及放大系数分布

Fig. 14 Distribution of acceleration and amplification coefficient of acceleration under check seismic waves

由上述图中可以看出：①在基岩输入地震加速度的作用下，有抗震措施坝体地震加速度反应随着高程的增加而相应增大，呈现出明显的放大效应；②有抗震措施坝体加速度反应随坝高的变化可以按约 2/3 坝高为界，大致分成两个线性变化段，上部的加速度放大效应强于下部；③在抗震措施加固范围以下高程，有抗震措施和无抗震措施坝体的加速度放大效应大体一致；在抗震措施加固范围内，有抗震措施坝体的加速度放大效应略强于无抗震措施坝体；④有抗震措施坝体坝顶地震加速度放大系数约为 3.0~3.4。

从试验结果分析可知，离心机振动台较好地再现了在地震作用下坝体内部加速度动态响应规律及坝体失稳破坏模式，为工程设计部门提供了参考依据，进一步验证了 NS-2 型离心机振动台设计性能指标完全满足工程科研需要。

4 结 论

(1) 介绍南京水利科学研究院 40 g·t 离心机振动台设计关键技术和性能指标，主要包括机械系统、液压系统、伺服控制系统，可为土工离心机振动台建设和规划提供参考。

(2) NHRI-40 g·t 离心机振动台的技术指标科学合理，设备的研制思路正确，波形控制系统可实现对

目标波形的跟踪、调节和再现，目标波形和再现波形拟合度高；基于 Labview 编制的数据采集系统包括 16 个应变采集通道和 24 个电压采集通道，对试验数据进行实时测量、显示和存储。

(3) 通过该离心机振动台测得国内某大坝的地震加速度响应分布表明，振动台的主要技术指标和性能达到了预期目的，完全能满足工程试验研究的需求。

参 考 文 献：

- [1] 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 Resources and Hydropower Research, 2006, 4(1): 15~22. (in Chinese))
- [2] 章为民, 日下部治. 砂性地基地震反应离心模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 28~31. (ZHANG Wei-min, KUSAKABE O. Dynamic centrifuge model test of sandy layer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 28~31. (in Chinese))
- [3] 张建民, 于玉贞, 濮家骝, 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 Jian-min, YU Yu-zhen, PU Jia-liu, 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))
- [4] 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 Nian-xiang, ZHANG Wei-min. Dynamic centrifuge model test for concrete face rock fill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 504~507. (in Chinese))
- [5] TAYLOR R N. Geotechnical Centrifuge Technology[M]. Glasgow: Blackie Academic and Professional, 1995.
- [6] 王年香, 章为民. 土工离心模型试验技术与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min. Geotechnical Centrifuge Technology and Application[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2015. (in Chinese))
- [7] 章为民, 赖忠中, 徐光明. 电液式土工离心机振动台的研制 [J]. 水利水运工程学报, 2002(1): 63~66. (ZHANG Wei-min, LAI Zhong-zhong, XU Guang-ming. Development of an electrohydraulic shake table for the centrifuge[J]. Hydro-science and Engineering, 2002(1): 63~66. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)