

DOI: 10.11779/CJGE2020S2002

# NHRI-400 g·t 大型土工离心机升级改造

陈生水<sup>1, 2</sup>, 顾行文<sup>\*1, 2</sup>, 任国峰<sup>1, 2</sup>, 徐光明<sup>1</sup>, 王年香<sup>1, 2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏南京 210029)

**摘要:** 作为国内最早的土工离心机之一, 南京水利科学研究院的 NHRI-400 g·t 大型土工离心机自 1991 年建成并投入使用以来, 已经运行 20 多年。2016 年—2017 年, 在不改变实验室房屋结构的前提下, 该离心机经历了彻底的升级改造。升级改造工作的主要内容包括机械系统、电气系统和数据采集系统。不同于传统的直流电机-减速机驱动方式, 升级后的离心机采用了全新的驱动方式, 即力矩电机直接驱动。新的数据采集系统包括 90 个静态数据通道和 38 个动态数据通道。升级改造后的 NHRI-400 g·t 大型土工离心机已服务于若干研究项目, 性能良好。

**关键词:** 土工离心机; 升级改造; 直流电机; 驱动系统; 数据采集系统

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0007-06

**作者简介:** 陈生水(1962—), 男, 江苏南京人, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事土石坝试验技术、安全评价、灾害预测与防控方法的研究。E-mail: sschen@nhri.cn.

## Upgradation of NHRI-400 g·t geotechnical centrifuge

CHEN Sheng-shui<sup>1, 2</sup>, GU Xing-wen<sup>1, 2</sup>, REN Guo-feng<sup>1, 2</sup>, XU Guang-ming<sup>1</sup>, WANG Nian-xiang<sup>1, 2</sup>

(1.Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** In Nanjing Hydraulic Research Institute (NHRI), the NHRI-400 g·t centrifuge has been operated for more than twenty years since established and put in use in 1991. It is one of the oldest machines in China. In 2016 and 2017, the machine was thoroughly upgraded without changing its basic engineering facilities. Upgradation is made mainly to the mechanical system, electrical system and data acquisition system. A torque motor and a matched driving control system are employed to drive the machine directly, rather than the traditional DC motor-reducer drive system. Also, the new data acquisition system includes 90 static data channels and 38 dynamic data channels. The upgraded NHRI-400 g·t geotechnical centrifuge has been served in several projects and performed well.

**Key words:** geotechnical centrifuge; upgradation; torque motor; driving system; data acquisition system

## 0 引言

土工离心模型试验技术通过施加在模型上的离心惯性力使模型的重度变大, 从而使模型的应力与原型一致。中国岩土力学研究的开拓者黄文熙先生称“离心模型是土工模型试验技术发展的里程碑”<sup>[1]</sup>。受前苏联的影响, 中国在 20 世纪 50 年代就开始接触了解离心模型试验方法。但受当时客观条件的限制, 直到 80 年代中国才真正着手土工离心机的建置工作<sup>[1-2]</sup>。

南京水利科学研究院是中国最早开展土工离心模型试验的单位之一。1982 年起, 利用 1 台 20 g·t 的光弹离心机开展不同项目的土工模型试验研究<sup>[3]</sup>。于 1983 年开始进行了厦门海滩上路堤稳定试验与现场试验比较、广东深圳五湾重力式码头的坍塌离心试验与现场码头坍塌相比较以及深圳赤湾防坡堤土工布加固试验<sup>[3-4]</sup>。其中五湾码头坍塌原因一文被 1988 年巴

黎国际离心模拟会议录用, 颇得同行专家的重视。会后被美国科技情报所 (isi) 列入索引在全世界交流<sup>[3]</sup>。

1980 年初黄文熙教授等访问了英国剑桥大学与曼彻斯特大学后, 1981 年水利部又派朱维新等 5 人考察了日本港湾技术研究所 1980 年刚落成的日本最大离心机, 并向国内进行了详细介绍。水利部于 1984 年又派出黄文熙、朱维新等 5 人赴美考察, 以研究中国建置大型土工离心机的必要性与可行性。在详细了解了前苏联、英国、美国、法国、荷兰、丹麦、德国、意大利和日本等国的 40 多台大、中、小型土工离心机

基金项目: 中央级科学事业单位修缮购置专项项目; 国家重点研发计划项目(2017YFC0405100, 2017YFC0404900); 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: xwgu@nhri.cn)

技术经济参数的基础上, 1984 年 11 月正式提出《关于建置土工大型离心机的必要性与可行性报告》, 并经同行专家评议, 一致建议先建一台半径 5 m、容量 400 g·t, 具有模拟地震功能的大离心机, 供全国水利、水电、水运系统及其它部门使用<sup>[2]</sup>。

1987 年, 当时的水利部和交通部同意共同投资建设 NHRI-400 g·t 大型土工离心机及实验室。设备和实验室于 1991 年正式建成并投入使用<sup>[2, 5]</sup>。

## 1 设备简介

### 1.1 性能参数

1991 年建成的 NHRI-400 g·t 大型土工离心机的主要技术特点和性能参数如下<sup>[5-6]</sup>:

①最大离心加速度 200g (按 5.0 m 半径), 最大负载 2 t, 容量为 400 g·t。②最大半径 (从转动中心至吊篮平台面) 为 5.5 m。③吊篮净空间尺寸 1.2 × 1.2 × 1.1 m。④主机驱动模式为直流电机-联轴器-减速箱-竖向传动主轴-大臂, 最大驱动功率为 520 kw。⑤在联轴器上安装了刹车系统, 在停机减速时启动。⑥具有运转时不平衡力的监控和自动调平系统, 最大调平能力为 200 kN, 若不平衡力超过 200 kN 则自动停机。⑦安装有 100 通道信号环和 10 通道电力环。⑧主轴上装有 1 个输气/水接头 (压力为 20 MPa)、1 个供水接头 (流量 380 L/min)、2 个输油接头 (压力为 20 MPa, 流量 30 L/min)。⑨配有 64 路数据采集系统, 放大倍数可调。⑩装有 TV 监控装置及图像数字化处理系统。⑪该离心机设计时, 考虑了将来安装振动装置对离心机的影响。

### 1.2 运行维护

除了对 NHRI-400 g·t 大型土工离心机进行日常维护保养, 实验室人员还在 1991 至 2015 年, 对传感器、监控系统、数据采集系统进行了不定期的升级改造, 大型维保和升级共有 2 次:

(1) 2000 年, 经过约 10 a 的使用, 原无极调速系统开始出现故障, 被更新为基于 PLC 模块和组件的直流调速系统, 离心机的运行控制精度得到了提升。

(2) 2007—2009 年, 离心机的机械系统经历了大修。直流电机返厂维修; 减速箱齿轮磨损严重, 按原设计重新定制; 更换了联轴器; 更换了润滑系统; 拆除了作用不明显的刹车系统; 拆除失效的不平衡力系统, 重新安装不平衡力传感器; 在主轴上方安装了仪器舱。

可以看出, 大修基本上是 10 a 进行一次, 但开展的 2 次大修一次针对电气系统, 一次针对机械系统, 均不全面。

## 2 升级改造方案

### 2.1 故障情况

在上一次大修之后, 经过 15 a 左右的运行, 离心机又开始出现一些故障。2015 年, 离心机故障越发严重和频繁:

- ①直流调速系统元器件老化。老款 PLC 的 CPU 靠特殊型号的电池供电, 因电池失效导致了程序丢失。再后来, 触摸屏、传输电缆、主板及其他组件均出现故障。很多组件已经停产, 市场上找不到备件。
- ②电机、配电系统老化严重。
- ③吊篮平台磨损和腐蚀严重, 平台面不平整, 且高 g 值重力场下吊篮有较大变形。
- ④原数据采集系统已跟不上研究需要, 通道数量少、传输速度慢。
- ⑤各类辅助设施不能得到足够的动力。
- ⑥不平衡力传感器失效。

### 2.2 前期工作

2015 年, 南京水利科学研究院组织专家对设备进行了检测分析, 并向水利部提交了附有详细升级改造方案的申请, 很快于当年获批并立项。2016 年, 升级改造工作正式开始, 工作目标很明确:

- ①全面恢复 NHRI-400 g·t 大型土工离心机的性能。
- ②建立更高效的驱动系统, 以及与之匹配的电气调速控制系统。
- ③升级数据采集系统。
- ④为各种辅助设备配备足够的接口, 提升该离心机的试验能力。

### 2.3 方案设计

按照工作目标, 升级改造将按如下步骤进行:

- ①全面检查离心机, 探明所有的隐患, 根据检查结果调整工作方案。
- ②拆除需要更换的零部件, 包括旧驱动系统、调速系统、润滑系统、主轴、接头、吊篮、仪器舱、不平衡力传感器、配电柜等。
- ③安装新配电开关柜。
- ④安装新的中空主轴、大臂、吊篮、不平衡力传感器。
- ⑤在主轴上方安装仪器舱、滑环系统。
- ⑥安装调试新的数据采集系统。
- ⑦安装新的驱动系统和润滑系统。
- ⑧安装新的调速系统, 并开始进行主机运行调试, 从低 g 值逐步测试、调整至高 g 值。
- ⑨美化离心机和机室。

工作的核心是机械系统、电气系统、数据采集系统升级改造, 下文进行详细说明。

## 3 机械系统升级改造

### 3.1 驱动系统

本次升级改造的创新之处在于为 NHRI-400 g·t 大型离心机设计了全新的驱动系统。

升级前的 NHRI-400 g·t 离心机结构见图 1<sup>[7]</sup>, 离心机主体位于离心机室, 驱动、润滑系统位于离心机

室下的地下室(坑道)。旧的驱动系统采用的是转臂式离心机传统的电机-联轴器-减速箱-主轴模式, 在联轴器的传动轴上还安装了刹车装置。限于上世纪的设计理念, 坑道空间较小, 基本上被驱动、润滑系统完全占用, 形成了闭塞不通风的环境, 每年的梅雨季节都需要鼓风机进行通风, 但除湿效果仍然不好。另外, 这种布局还导致检修不便。在 2007—2009 年的那次大修中, 电机的返厂维修耗费了大量的人力和时间。

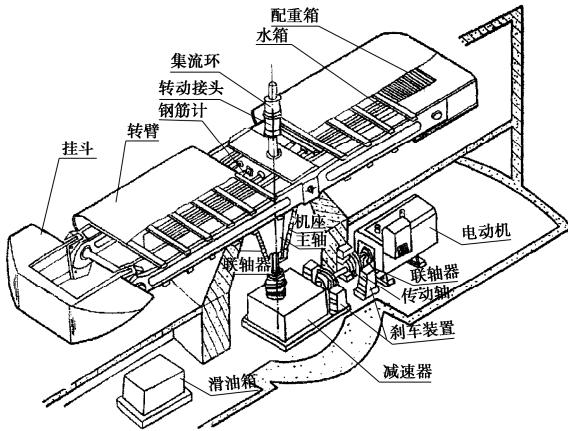


图 1 升级前 NHRI-400 g·t 大型离心机布置图

Fig. 1 Layout of NHRI-400 g·t centrifuge before upgradation

本次升级改造, 创新地提出了采用力矩电机直接驱动主轴的方案。力矩电机是中空圆柱体, 固定于机座下方, 与新设计的中空主轴相连。这样的设计便于在电机的下部安装旋转接头, 接头的管路从电机和主轴向上穿出至大臂。一共设计了 7 路旋转接头(4 路供油, 压力 21 MPa; 2 路供水, 压力 2 MPa; 1 路供气, 压力 2 MPa), 可将具有一定压力和流量的油、水、气传输到大臂, 实现运转过程中的辅助功能, 如为振动台、冻融装置、加载装置等辅助设备提供动力或流体交换, 还可模拟蓄水、降雨等试验过程。

新的力矩电机直接驱动系统, 不需要联轴器、减速箱等, 结构简洁(图 2), 使得坑道空间不在拥挤, 空气流通畅顺, 有利于日常检修、除湿。

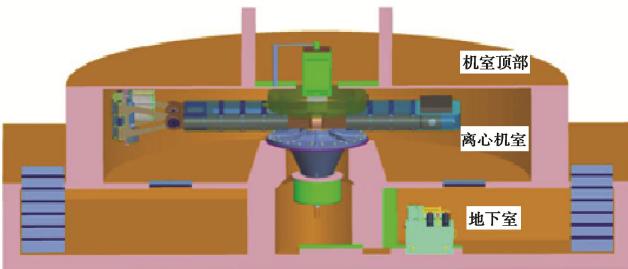


图 2 升级改造后的 NHRI-400 g·t 离心机布置图

Fig. 2 Layout of NHRI-400 g·t centrifuge after upgradation

### 3.2 润滑冷却系统

重新设计的润滑冷却系统, 与新的驱动系统相匹配。润滑冷却系统采用 PLC 模块, 集成至电气调速系

统进行控制。正常情况下, 润滑系统运行的同时, 机油也具备了冷却功能, 但是在离心机长时间开启的情况下, 需要打开循环水冷却系统进行设备冷却。

### 3.3 大臂

旧的离心机大臂由 4 根高强度拉力带、定位板、水箱、钢筋计、配重箱、蒙皮等组成(图 1), 其中钢筋计在 2009 年更换过, 也已失效。经无损探测, 大臂的升级改造(图 3), 保持原拉力带、定位板、配重箱、蒙皮; 拆除水箱、钢筋计; 安装 4 个新型力传感器监测不平衡力; 并充分利用大臂内部空间, 将振动台用蓄能器、旋转接头管路、数据采集电缆等进行隐藏安装。

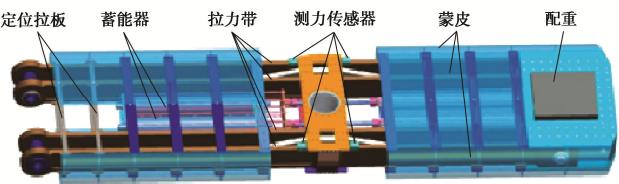


图 3 升级改造后的大臂

Fig. 3 Upgraded rotating arm

### 3.4 吊篮

旧的吊篮为组合结构, 利用一根长的连接轴安装在大臂上, 如图 4 左。这种设计使得模型的吊装和移除都必须按照 L 形路线进行, 极其不便。吊篮平台采用 4 根横梁外加横向支撑筋由螺纹连接而成, 且采用了部分铝材, 虽然较好地控制了重量, 但经过多年使用, 吊篮平台锈蚀严重, 表面已经不平整。

新吊篮采用整体结构, 通过 2 根短轴连接于大臂(图 4 右), 方便了模型的直线吊装和移除。由高强度合金钢制成的整体式吊耳与高强度合金钢整体焊接式平台, 在保证吊篮承载力的同时, 有效控制了吊篮的重量。新吊篮可通用于静动力试验。新吊篮的净空尺寸为 1.4 m×1.2 m×1.2 m, 比旧吊篮的空间略大。

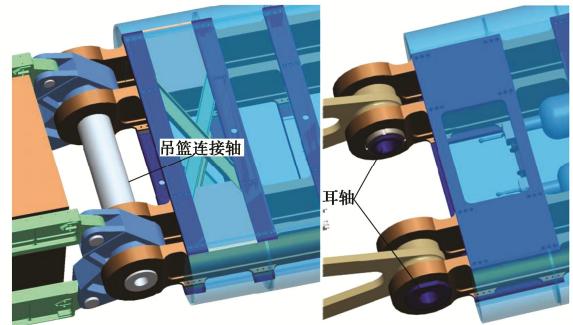


图 4 新旧吊篮连接轴

Fig. 4 Basket mounting axis before and after upgradation

### 3.5 仪器舱

为 NHRI-400 g·t 离心机的辅助设施、数据采集系统、集流环的安装、控制、传输等, 并考虑离心机后续的功能拓展, 在大臂转动轴心处的上部安装了新的

仪器舱。

仪器舱内部分 3 层安装空间, 上层为静态数采装置安装空间、中层为动态数采安装空间、下层为振动台及机器人等的控制装置安装空间。还预留了足够的功能拓展空间。

## 4 电气系统

### 4.1 调速系统

新的力矩电机直接驱动系统, 需要与之相匹配的调速系统。

新的调速系统采用西门子 6RA80 系列可逆全数字直流调速器, 通过电流反馈和脉冲编码器转速反馈构成双闭环调速方式, 控制电机转速实现对离心机加速度的控制。调速系统单向运行, 逆变制动, 具有电流自适应功能、自诊断处理功能和跟踪/保持功能; 调速器配置 Profibus-DP 模块, 接收来自 PLC 的控制指令; 配置 SBP 编码器接口模块, 采集电机轴编码器的转速信号, 通过 DP 总线传输到 PLC, 实现离心机的加速度测量。

新调速系统特点如下:

①集成了可控硅整流模块, 冷却风扇, 使系统结构紧凑, 可靠性高; ②所有算法均由高效 16 位微处理器完成, 微处理器较高的工作主频, 保证了全数字方式下电流环的快速性, 获得优异的动态性能; ③采用可逆无环流反并联系统, 具有快速的调节性能; ④能对电流环、速度环、磁场等进行优化, 使系统调节到最佳状态进行工作; ⑤具有完备的监控和诊断功能, 只有在安全启动条件(润滑、油压、温度、配平、机室门关闭等)完全满足时才能启动离心机, 运行过程中能对电网故障、通信接口故障、传动系统故障、起动过程故障等, 实现有效的判断和保护; ⑥带光电编码器反馈的闭环控制系统具有很好的动态性能和很高的控制精度。

### 4.2 安全监控系统

为离心机配备了新的安全监控系统, 包含 8 通道监控。目前已使用 5 通道, 监控对象包括: 大臂、吊篮(顶部和侧面)、电机及旋转接头、稀油站, 还预留了 3 个监控通道, 以备辅助设施的拓展使用。

## 5 数据采集系统

### 5.1 集流环系统

在新的仪器舱顶部, 安装了集流环系统, 包括光纤滑环、信号滑环和功率滑环。

光纤滑环为 4 通道; 信号环为 60 环(2 A, 220 V); 功率环为 20 环(30 A, 380 V)。

### 5.2 静动态数据采集系统

新的数据采集系统分为静态部分和动态部分。

静态数据采集系统由航空插头面板、IMP 模块、直流稳压电源、上位机组成, 共 90 个通道, 其中 70 个应变测试通道、20 个电压测试通道。应变测试范围  $0\sim10000 \mu\epsilon$ ; 电压测试范围  $0\sim10 \text{ V}$ 。系统的数据采集频率最高为 1 Hz。

动态数据采集系统包含 16 个应变测试通道和 22 个电压测试通道。应变测试范围  $0\sim25000 \mu\epsilon$ ; 电压测试范围  $0\sim10 \text{ V}$ 。数据采集频率最高达 5 kHz。

## 6 其他改造

除机械系统、电气系统、数据采集系统升级改造之外, 还开展了一些其他的工作:

①在机室顶安装了 2 圈灯带, 试验过程中可以提供足够的照明, 便于图像和录像的采集。②机室门安装了关闭联锁开关, 确保运行安全。③机室顶、侧壁、底面均进行了加固, 并统一涂色。④离心机整体进行了形象设计。⑤为辅助设施预留接口, 如振动台、机械手、溃坝系统、冻融系统、竖向加载装置、水平加载装置、船行波模拟装置等。

经过全面升级改造, 全新的 NHRI-400 g·t 大型土工离心机如图 5 所示。

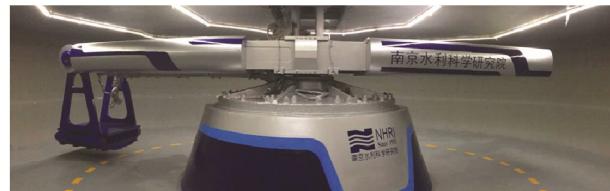


图 5 全新的 NHRI-400 g·t 大型土工离心机

Fig. 5 Upgraded NHRI-400 g·t centrifuge

## 7 升级改造后部分试验

### 7.1 渠道湿干-冻融耦合作用下劣化试验研究<sup>[8]</sup>

研制了湿干冻融离心模型试验平台(图 6)。采用该试验设备, 研究了膨胀土输水渠道在经历湿干交替、冻融循环的恶劣自然气候作用下的劣化过程。

模型渠道布置如图 7 所示。图 8 为湿-干过程中土体孔压变化曲线, 图 9 为冻-融过程中各测点的温度变化曲线, 图 10 为渠道模型竖向位移量变化曲线。

可以看出: ①设备良好地模拟了渠道的水位升降过程, 与现场渠道的注水期、蓄水期和排水期相符; 也良好地模拟了渠道表面的干燥过程。②设备的热交换能力可靠、稳定; 冻结深度可至 2 m 以上, 而该地区冬季渠基土最大冻深约 1.8 m; 该设备可以满足北疆季冻区渠道的冻融过程研究需要。③渠底和渠坡均出现了显著的冻胀现象, 渠顶的冻胀现象不明显。渠

底和渠坡的冻胀速率在初始阶段较大; 后期, 渠底冻胀趋于稳定, 而渠坡冻胀仍持续增长, 但冻胀速率放缓。④融化过程模拟时, 渠底、渠坡和渠顶均出现了显著的融沉现象, 渠底和渠顶融沉速率相近, 渠坡融沉速率显著大于渠底和渠顶。



图 6 湿干冻融离心模型试验平台

Fig. 6 Wetting-drying and freeze-thaw coupled centrifuge modeling system

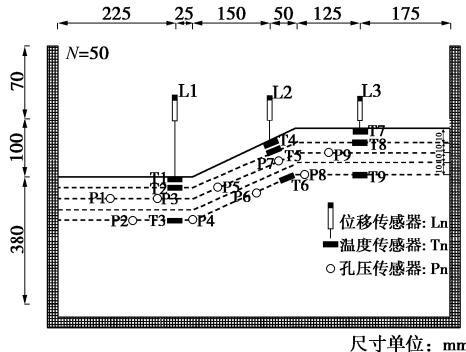


图 7 渠道模型布置

Fig. 7 Model setup of canal

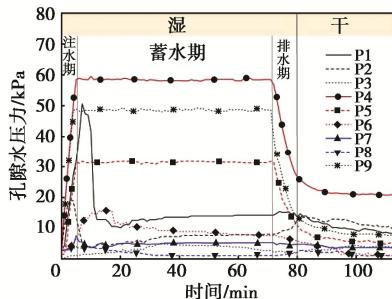


图 8 湿-干过程孔压曲线

Fig. 8 Pore pressures during wetting-drying process

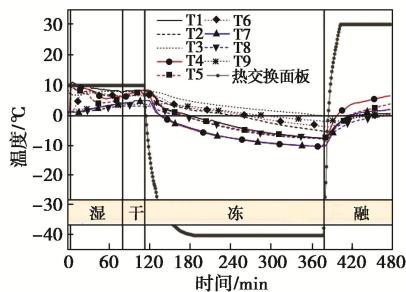


图 9 土体温度变化曲线

Fig. 9 Temperature curves

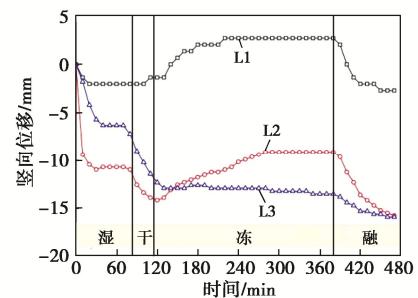


图 10 渠道模型竖向位移变化曲线

Fig. 10 Vertical displacement curves

## 7.2 前坪水库大坝变形试验<sup>[9]</sup>

采用离心模型试验手段, 模拟了前坪水库黏土心墙坝在施工期、蓄水期和运行管理期变形发生发展的过程, 揭示了黏土心墙中超孔压的累计消散对坝体变形特性的影响规律。模型照片如图 11。试验和计算的坝顶沉降过程曲线如图 12。试验测得的孔压变化曲线如图 13。离心模型试验结论如下:

①试验直观体现了黏土心墙坝在施工期、蓄水期和运行管理期的变形发展过程, 揭示了黏土心墙中超孔压的累计消散对坝体变形特性的影响规律。②坝体主要沉降变形发生在施工期, 蓄水引起的坝体沉降量不大。③坝体运行期沉降发展缓慢, 沉降达到稳定状态需要约 7 a 时间。④在长期蓄水作用下, 心墙未出现裂缝, 上游水位未发生变化, 下游未见明显渗水, 表明黏土心墙有很好的防渗性能, 心墙未发生渗流破坏。

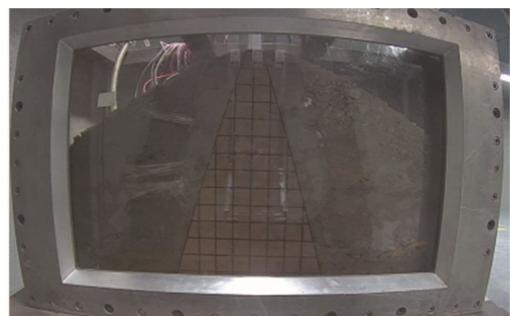


图 11 吊篮中的前坪心墙坝模型

Fig. 11 Model for Qianping dam in basket

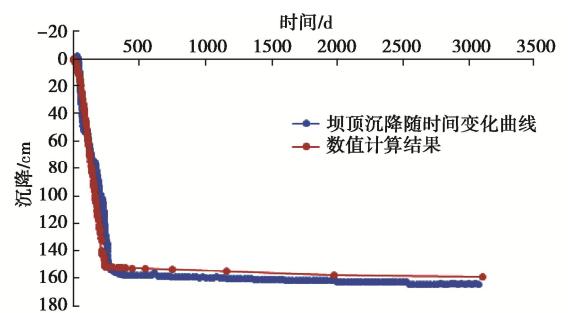


图 12 坝顶沉降曲线

Fig. 12 Settlements of Qianping dam crest

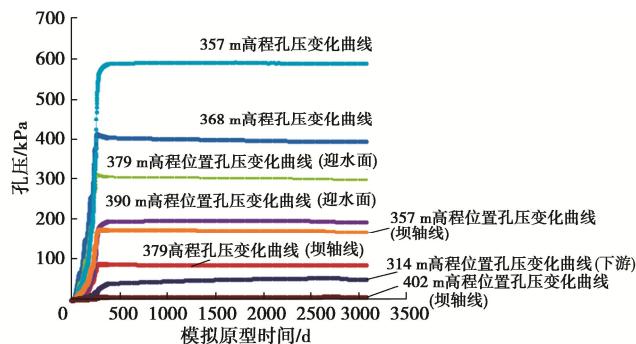


图 13 坝体心墙孔压曲线

Fig. 13 Pore pressures of Qianping dam core

## 8 总 结

自 1991 年建成以来, NHRI-400 g·t 大型土工离心机已运行 20 多年。2016 和 2017 年, 在不改变实验室房屋结构的前提下, 该离心机经过了全面的升级改造。主机机械系统、电气系统、数据采集系统都得到了升级改造。

经过全面测试, 该离心机的性能指标完全恢复。目前, 在该设备上已经成功地开展了一些试验, 并正在持续开展试验研究工作。NHRI-400 g·t 大型土工离心机再次焕发出勃勃生机。

## 参考文献:

- [1] 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))
- [2] 朱维新. 土工离心模型试验研究状况[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 82 - 95. (ZHU Wei-xin. Centrifuge modeling for geotechnical engineering in the world[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(2): 82 - 95. (in Chinese))
- [3] ZHU Wei-xin, LIU Shou-hua. NHRI geotechnical centrifuge operation[C]// Proc of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, 1988, Paris.
- [4] 朱维新, 陈绪禄. 土工离心模型试验探索[C]// 第四届全国土力学与基础工程会议, 1983, 武昌: 183 - 190.
- [5] DOU Y, JING P. Development of NHRI - 400 g·t geotechnical centrifuge[C]// Centrifuge 94-Leung, Lee & Tan (eds), Rotterdam: Balkema. 1994: 69 - 74.
- [6] 章为民, 窦 宜. 土工离心模拟技术的发展[J]. 水利水运科学研究, 1995, 9(3): 294 - 301. (ZHANG Wei-min, DOU Yi. Development of geocentrifuge modelling in NHRI[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1995, 9(3): 294 - 301. (in Chinese))
- [7] 刘守华. 南京水利科学研究院土工离心模型发展概况[J]. 海洋工程, 1990, 8(3): 55 - 62. (LIU Shou-hua. Development of the geotechnical centrifuge modelling[J]. The Ocean Engineering, 1990, 8(3): 55 - 62. (in Chinese))
- [8] ZHANG Chen, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Laboratory and centrifuge model tests on influence of swelling rock with drying-wetting cycles on stability of canal slope[J]. Advances in Civil Engineering, 2018: 1 - 10.
- [9] 武颖利, 李小梅, 郭万里. 前坪水库坝体协调变形与渗流稳定关键技术研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2019. (WU Yin-li, LI Xiao-mei, GUO Wan-li. Research on Coordinated Deformation and Seepage Stability of Qianping Dam[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2019. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)