

文章编号:0559-9350(2018)08-0901-06

土石坝溃坝离心模型试验中水流控制与测量

陈生水^{1,2}, 徐光明¹, 顾行文¹, 钟启明^{1,2}, 任国峰¹

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对目前土石坝溃坝离心模型试验中存在的问题, 研发了一套伺服水阀流量控制装置, 显著提高了土石坝溃坝离心模型试验上游来水条件的控制精度, 有效降低了模型试验结果的不确定性; 建立了土石坝溃坝离心模型试验的水流相似准则; 提出了一种采用内置于模型箱端板上的薄壁矩形量水堰测量土石坝溃坝离心模型试验中溃坝洪水流量过程的方法, 并通过超重力场下的放水试验, 证明了薄壁矩形量水堰的流量系数与离心机加速度无关, 采用内置于模型箱端板上的薄壁矩形量水堰可准确测定土石坝溃坝离心模型试验中的溃坝洪水流量过程。

关键词: 土石坝溃坝; 离心模型试验; 水流相似准则; 流量控制与测量

中图分类号: TV461

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slx.20180347

正确揭示土石坝溃坝机理, 建立合理模拟其溃口发展规律和溃坝洪水流量过程是提高土石坝溃坝应急预案科学性的关键, 为此, 国内外围绕土石坝溃决机理开展了大量模型试验研究^[1-2]。然而, 土石料的应力应变特性与其所承受的应力水平密切相关, 具有显著的非线性, 小尺度的土石坝溃坝机理模型试验由于模型与原型的应力水平相差过大, 试验结果不符合实际; 野外大尺度溃坝机理试验结果无疑更接近原型坝实际, 但费用高、周期长, 且随着坝高的增加, 风险控制将十分困难^[1]。离心机高速旋转所产生的超重力场可大幅提高试验模型的应力水平, 因此离心模型试验不失为一种开展土石坝溃坝试验的有效方法。但开展土石坝溃坝离心模型试验需解决以下3个关键技术问题: (1) 需在现有离心机中增设一套水流控制系统, 持续提供足够的溃坝水流; (2) 需建立溃坝水流离心模型试验相似准则; (3) 应能准确测量土石坝溃坝洪水流量过程。本文将重点介绍作者围绕上述3个关键技术问题所开展的相关工作。

1 上游水流条件的模拟与控制

1.1 大流量水流控制系统 陈生水等^[3]于2010年研制了一套如图1所示的以环形接水槽为核心的离心机大流量水流控制系统, 它具有以下特点: (1) 溃坝水流由离心机室外水箱提供, 解决了在离心机大臂上设置贮水箱, 因贮水箱中水体重量显著变化而影响离心机平衡, 严重威胁离心机安全这一问题^[1]; (2) 环形接水槽与离心机旋转轴同轴, 有利于高速旋转条件下环形接水槽结构安全, 且入水口与高速旋转的环形接水槽之间无硬件接触, 有效解决了固定件与旋转件之间的磨损和渗漏问题, 输水流量也不受接触限制; (3) 在下游端设置了集水和排水系统, 溃坝水流可直接下泄至离心机室地面, 通过地面槽口汇流至下层基坑中的集水箱, 再由潜水泵自动排出。该水流控制系统可在100倍超重力场条件下正常工作, 可持续稳定提供溃坝水流, 最大流量达3000 L/min。应用该系统

收稿日期: 2018-04-18; 网络出版日期: 2018-08-23

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180823.1718.003.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404806); 国家自然科学基金项目(51539006, 51779153)

作者简介: 陈生水(1962-), 男, 江苏南京人, 教授级高级工程师, 主要从事岩土力学与土石坝工程研究。

E-mail: sschen@nhri.cn

开展了最大坝高 32 m 的土石坝溃坝离心模型试验，分别揭示了均质土坝、心墙坝、面板堆石坝和堰塞坝的溃决机理^[4-7]。

需要指出的是，该水流系统蝶阀的控制是手动的，只有一种模式：开启—稳定—关闭，蝶阀的开启过程在每次试验中很难保持完全一致，导致溃坝模型试验上游来水条件控制精度较低，增加了溃坝模型试验结果的不确定性。

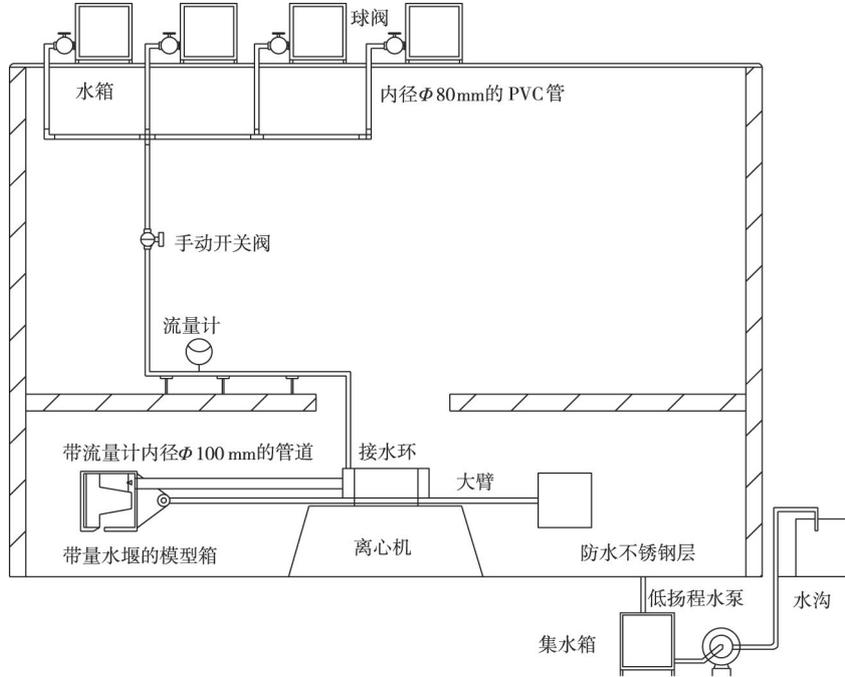


图1 NHR1-400 gL离心机大流量水流控制系统

1.2 伺服水阀流量控制装置 为了提高土石坝溃坝离心模型试验上游来水条件的控制精度，2017年研发一套伺服水阀流量控制装置，以代替原水流控制系统中的蝶阀，如图2所示。该装置的核心部件为一只电机驱动的伺服水阀和一套基于自动反馈原理的控制系统。控制系统负责实时检测流量计信号，并给伺服水阀发出信号，控制水阀增大或缩小开度。

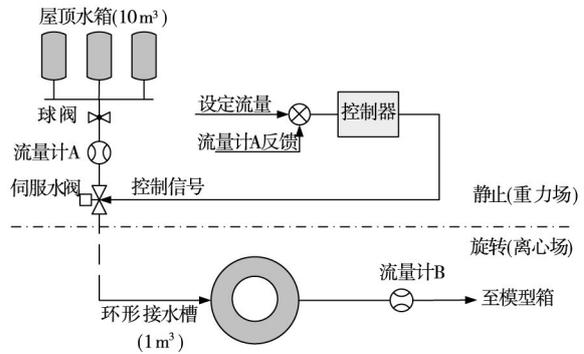


图2 伺服水阀流量控制装置

为检验该伺服水阀流量控制装置的有效性，通过放水试验，比较分析了实际流量过程与设计目标流量过程的相关性。首先考察目标峰值流量的跟踪情况。从图3中伺服水阀开度过程曲线可知，伺服水阀在接受控制器指令后，阀门开度在28 s内迅速从零增大至80%，设定的目标峰值流量为14 L/s；而该时刻实测峰值流量为12 L/s，约10 s后实测峰值流量才达到14 L/s。分析发现，实测流量达到12 L/s后，流量增速放缓与蝶阀前供水流量与水头有关，如想进一步缩短伺服水阀响应时间，可考虑增大蝶阀前供水流量值和水头值。再来考察残余流量过程的跟踪情况。由于残余流量数值较小，伺服水阀在跟踪目标残余流量时，阀门开度并没有直接缩小至44%，而有一个缓和的调整过程，用时约80 s，开度从52%逐渐调整至44%，这样使得该时段的流量过程避免了大的起伏，实测流量过程曲线与目标流量过程曲线吻合较好。可见，跟踪目标峰值流量时，要求伺服水阀快速响应；而跟踪残余流量时，要求伺服水阀缓和响应，平缓过渡而避免大的起伏。

从图3所给出的目标流量过程与实测流量过程对比可以发现，通过在离心机大流量水流控制系统

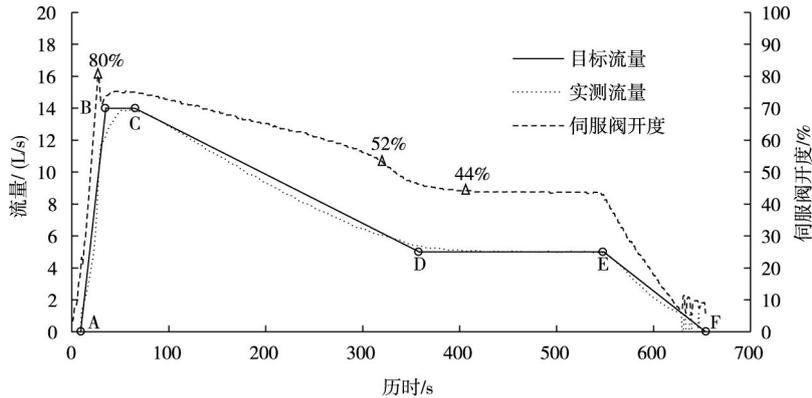


图3 目标流量过程和实测流量过程对比

增设伺服水阀流量控制装置，溃坝离心模型试验上游来水条件的控制精度得到显著提高，有效降低了溃坝离心模型试验结果的不确定性。

2 土石坝溃坝离心模型试验中的水流相似准则

如上所述，离心机高速旋转所产生的 N 倍重力加速度场 (Ng 超重力场)，使得土工构筑物几何尺寸缩小 N 倍后，模型与原型的应力水平相同，因此，离心模型试验方法被称之为土工物理模型试验的里程碑^[8]。土石坝溃坝是典型的水土耦合作用过程，通过土石坝溃坝离心模型试验研究原型坝溃坝过程，除了建立土石料的离心模型试验相似准则，还需建立溃坝水流离心模型试验相似准则，本文将根据能量守恒定律建立土石坝溃坝离心模型试验中的水流相似准则。

土石坝漫顶溃坝过程中，溃口水流的下泄是一个势能转化为动能的过程，选取溃口之前某个位置的水流单元 ΔV ，如图4所示，它具有势能 $\rho\Delta Vgh$ ， h 为水流单元 ΔV 下泄至溃口下游某个位置时的相对位置高度差。忽略水流单元 ΔV 在溃口发生之前的动能，势能 $\rho\Delta Vgh$ 经过溃口，损失一部分 $\eta\rho\Delta Vgh$ ，这里 η 为能量损失比，残余势能 $(1-\eta)\rho\Delta Vgh$ 全部转化为动能 $\rho\Delta Vv^2/2$ ，此时水流的速度 v 为：

$$v = \sqrt{2(1-\eta)gh} \quad (1)$$

式中：无量纲的能量损失比 η 在模型和原型中是相等的^[9]， $\eta_m = \eta_p$ ； g 为重力加速度，模型值为原型的 N 倍， $g_m = Ng_p = Ng$ ； h 为相对位置高度差，满足几何相似， h_m 为原型的 $1/N$ ，即 $h_m = h_p/N$ 。将上述关系代入式 (1)，可以得出，模型水流流速 v_m 与原型水流流速相等 v_p 即：

$$v_m = v_p \quad (2)$$

流量为流速和水断面积的乘积，已知模型坝溃口过水断面面积 A_m 为原型的 $1/N^2$ ，即 $A_m = A_p/N^2$ ，所以，模型溃决水流流量 Q_m 为原型 Q_p 的 $1/N^2$ ，即：

$$Q_m = Q_p/N^2 \quad (3)$$

水流速度为单位时间内水体移动的距离，已知模型水流流过的长度为原型的 $1/N$ ，可以反求所用的时间 t_m ：

$$t_m = \frac{L_m}{v_m} = \frac{L_p/N}{v_p} = \frac{t_p}{N} \quad (4)$$

显然，模型溃决水流过程中的时间 t_m 为原型 t_p 的 $1/N$ 。

从上述导出的土石坝溃坝离心模型试验中的水流相似准则可以发现，模型与原型的水流流速相

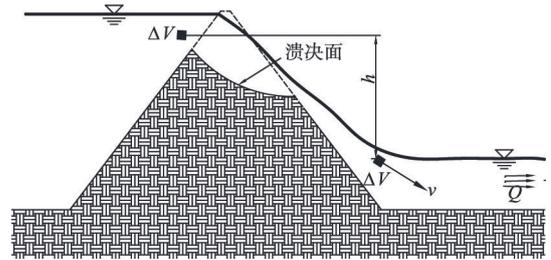


图4 溃坝水流运动示意图

等，模型流量为原型的 $1/N^2$ ，模型坝溃坝时间为原型的 $1/N$ 。因此，土石坝溃坝离心模型试验应力与水流相似准则明确，借助于离心机高速旋转产生的超重力场所具有的“时空压缩效应”可较好重现土石坝溃坝过程。溃坝离心模型试验与室内小尺度溃坝模型试验相比，大幅提高了模型应力水平，试验结果更符合实际；与野外大尺度溃坝试验相比，费用低且风险可控。

3 溃坝洪水流量测量

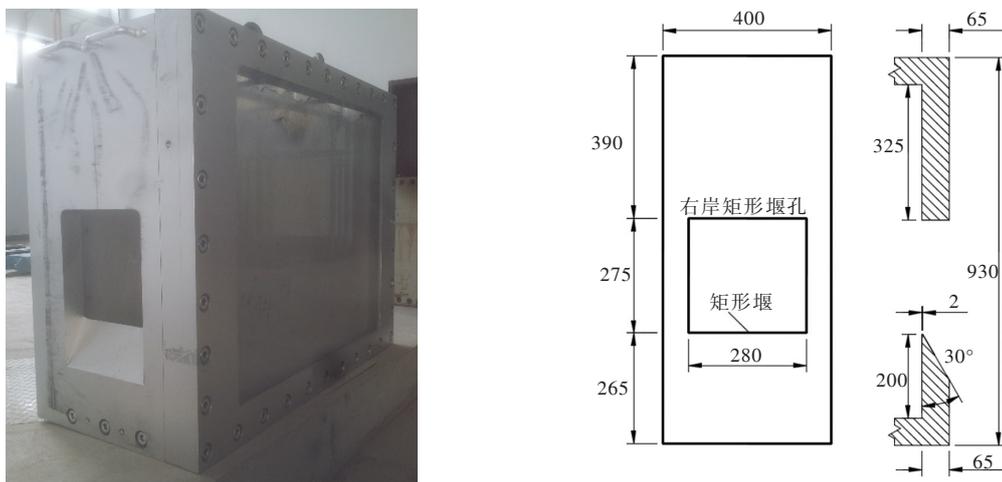
3.1 带薄壁矩形量水堰的模型箱 土石坝溃坝试验除了揭示其溃坝机理外，另一个很重要的目的是获得溃坝形成的洪水流量过程，为计算分析溃坝洪水演进致灾过程提供初始输入，从而提高溃坝应急预案的科学性。然而，溃坝形成的洪水不仅是非恒定流、流量变幅大，而且含有大量的土石料，给溃坝洪水流量过程测量带来了很大的困难。作者^[3]曾采用管道型电磁式流量计测量溃坝洪水流量过程，结果发现，不仅管道不能始终保持为有压流，而且溃坝洪水中夹带的土石料，曾导致流量计一度不能正常工作。后来采取用水泥土模拟下游河道，引导溃坝洪水集中顺畅地通过流量计的办法，较好解决了这一问题。王秋生^[10]在其溃坝离心模型试验中，设置了一种夹角为 45° 的三角薄壁量水堰，但是由于离心机吊篮尺寸的限制，离心机在目标离心加速度的稳定时间过短，加上风场作用等原因，发现在离心机中采用三角量水堰测量溃坝洪水流量存在较大误差。为此，作者研发了一种薄壁矩形量水堰，并对其流量系数进行了率定。

薄壁矩形量水堰内置于模型箱端板上(如图5所示)，薄壁堰口下游面与上游直立面成 30° 夹角，堰口宽度为 280 mm，堰顶至模型箱底的距离为 200 mm。为了在超重力环境中测量堰前水头，在模型箱中放置了水压力传感器。根据水流能量守恒定律可得到薄壁矩形量水堰的流量公式：

$$Q = m_0 B \sqrt{2Ng} H^{1.5} \quad (5)$$

式中： Q 为流量； B 为矩形堰宽度； N 为离心机加速度与重力加速度 g 之比； H 为不包括行近流速水头的堰前水头； m_0 为包含行近流速影响在内的薄壁矩形堰流量系数。

当 $N=1$ 时，式(5)即为普通重力场下薄壁矩形堰的流量计算公式。



(a) 模型箱照片

(b) 矩形量水堰尺寸(单位: cm)

图5 带薄壁矩形量水堰的模型箱

3.2 薄壁矩形量水堰流量系数率定 为了率定模型箱内置的薄壁矩形量水堰的流量系数，在超重力场中进行了放水试验，试验时在模型箱中安装了两只水压力传感器，用以测量堰前水头 H_1 和 H_2 。另外，分别在伺服水阀的阀前和环形接水槽至模型箱之间安装两只电磁式流量计，分别用以测量水流控制系统的调节水流量 Q_A 和实际进入模型箱的水流量 Q_B 。

其中一组小流量放水试验的离心加速度设定在 $50g$ ，设定恒定水流的流量为 3.7 L/s 。在模型被加速至 $50g$ 时，开启伺服水阀流量控制装置和数据采集系统，对试验水流进行流量控制，同时测定堰前水体深度，扣除堰高后计算出堰前水头。图6为 $50g$ 超重力场下放水试验过程中堰前水头 H 和流量 Q 随时间的变化曲线。

从图6中可以发现，流量 Q_A 和 Q_B 在开始阶段都有强烈波动，这是开阀瞬间信号干扰所致，并非有真实的流量波动。约 60 s 以后，流量计工作正常，所给出的测量值才是真实的流量值。从图中两条流量过程曲线可知， Q_A 和 Q_B 很快接近，至 90 s 时已完全重合，说明通过流量控制装置调节的水流，已经完全进入模型箱中成为堰前水流。

同时从图6给出的两个测点处的堰前水头变化曲线看，堰前水头在 30 s 左右达到最大值，但由于初始涌浪影响，尤其是水压传感器2距离入流处较近，影响更为明显^[11]。但在 80 s 后两个测点测得堰前水头均趋于平稳，两个测点测得的堰前水头均值分别为 11.5 mm 和 10.5 mm 。取 $H_m=0.0105\text{ m}$ ，计算出的水流速度 $v_m=1.26\text{ m/s}$ 。根据前述水流运动相似律，换算至原型尺度，堰前水头为 $H_p=0.55\text{ m}$ ，流速 $v_p=1.26\text{ m/s}$ ，流量 $Q_p=9.25\text{ m}^3/\text{s}$ 。

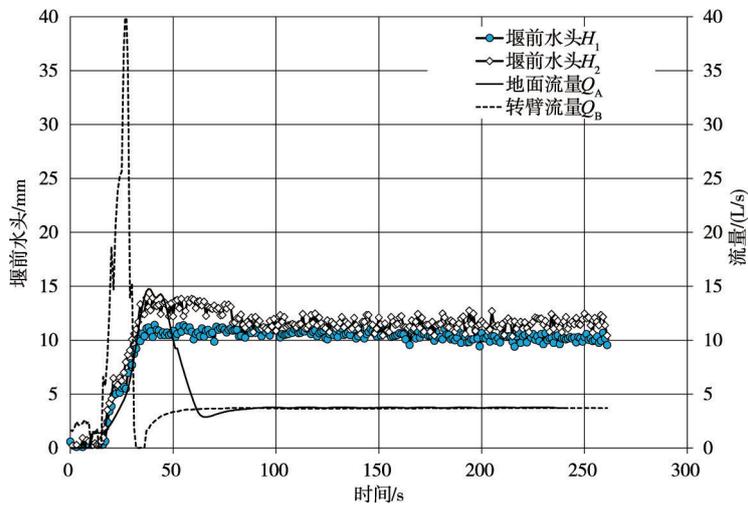


图6 超重力下放水试验中堰前水头和流量过程曲线

已知流过薄壁矩形量水堰的流量 $Q=3.7\text{ L/s}$ ，堰前水头 $H_m=0.0105\text{ m}$ ，离心机加速度为 $50g(N=50)$ 。根据式(5)，率定得到薄壁矩形量水堰的流量系数 m_0 值为 0.395 。与普通重力场 ($1g$) 下水力学试验得到的薄壁矩形量水堰的流量系数几乎一致^[12]。这证明薄壁矩形量水堰的流量系数与离心加速度无关，采用内置于模型箱端板上的薄壁矩形量水堰可准确测定土石坝溃坝离心模型试验中的溃坝洪水流量过程。

4 结论

针对目前土石坝溃坝离心模型试验存在的问题，研发了一套伺服水阀流量控制装置，显著提高了溃坝离心模型试验上游来水条件的控制精度，有效降低了溃坝离心模型试验结果的不确定性；根据能量守恒定律，建立了土石坝溃坝离心模型试验中的水流相似准则，发现模型与原型的水流流速相等，模型流量为原型的 $1/N^2$ ，模型坝溃坝时间为原型的 $1/N$ ，借助于离心机高速旋转产生的超重力场所具有的“时空压缩效应”，土石坝溃坝离心模型试验可较好重现土石坝溃坝过程；提出了一种采用内置于模型箱端板上的薄壁矩形量水堰测量土石坝溃坝离心模型试验中溃坝洪水流量过程的方法，并通过超重力场下的放水试验，证明了薄壁矩形量水堰的流量系数与离心机加速度无关，采用内置于模型箱端板上的薄壁矩形量水堰可准确测定土石坝溃坝离心模型试验中的溃坝洪水流量过程。

致谢：本项研究工作得到中国工程物理研究院总体工程研究所洪建忠、张建全、郑殿成和吴忠杰等的大力支持，在此表示衷心感谢。

参 考 文 献：

- [1] 陈生水. 土石坝溃决机理与溃坝过程模拟[M]. 北京：中国水利水电出版社，2012.
- [2] ASCE/EWRI Task Committee on Dam/Levee Breaching. Earthen embankment breaching[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(12): 1549-1564.
- [3] 陈生水, 徐光明, 钟启明, 等. 土石坝溃坝离心模型试验系统研制及应用[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 241-245.
- [4] CHEN S S, FANG X S, ZHONG Q M, et al. Centrifugal model tests and numerical simulations for break of earth-rock dams due to overtopping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 922-932.
- [5] 陈生水, 曹伟, 钟启明. 粘土心墙坝漫顶溃坝过程离心模型试验与数值模拟[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 674-679.
- [6] 陈生水, 曹伟, 霍家平, 等. 混凝土面板砂砾石坝漫顶溃决过程数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1169-1175.
- [7] 赵天龙, 陈生水, 王俊杰, 等. 堰塞坝漫顶溃坝离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 1965-1972.
- [8] BUTTERFIELD R. Scale-modelling of fluid in geotechnical centrifuges[J]. Soils and Foundations, 2000, 40(6): 39-45.
- [9] SZIRTES T. Applied Dimensional Analysis and Modeling[M]. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [10] 王秋生. 土石坝溃坝问题的离心模型试验研究[D]. 北京：中国水利水电科学研究院，2010.
- [11] 徐光明, 顾行文, 任国峰. 水流运动离心模型相似律和水流控制装置研究[R]. 南京：南京水利科学研究院，2018.
- [12] 华东水利学院. 水力学[M]. 2版. 北京：科学出版社，1983.

Flow control and measurement in centrifugal model tests for earth-rock dam breaching

CHEN Shengshui^{1, 2}, XU Guangming¹, GU Xingwen¹, ZHONG Qiming^{1, 2}, REN Guofeng¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques,
Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Aimed at the existing problems in the centrifugal model tests for earth-rock dam breaching, a set of servo water valve flow control device was developed. The control precision of upstream inflow condition was improved significantly after the adoption of the device, therefore, the uncertainty of the results of centrifugal model test for earth-rock dam breaching was effectively reduced. In addition, the similarity criterion of water flow in the centrifugal model tests for earth-rock dam breaching is established. Meanwhile, a measuring method utilizing a thin-walled rectangular water weir which was placed into the end plate of the model box is developed to measure the discharge hydrograph of dam breach in the centrifugal model tests. Furthermore, based on the outflow tests under the high gravity field, the conclusion can be drawn that the flow coefficient of the thin-walled rectangular water weir has no connection with the centrifugal acceleration, so the measurement method can give the accurate breach flow discharge hydrograph for centrifugal model tests.

Keywords: earth-rock dam breach; centrifugal model test; similarity criterion of water flow; flow control and measurement

(责任编辑：杨虹)