



YIHONGDAO

SHUIGONG MOXING

SHIYAN YU FENXI

# 溢洪道

## 水工模型试验与分析

张庆华 宋学东 著



黄河水利出版社

# 溢洪道水工模型试验与分析

张庆华 宋学东 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

## 内 容 提 要

本书主要内容为溢洪道水工模型试验实例及溢洪道水力设计分析。分上、下两篇,上篇为模型试验篇,介绍了具有代表性的8座水库溢洪道水工模型试验与分析,其中底流(消力池)消能3座、挑流消能5座(含泄槽弯道段设置导流墙的溢洪道1座,挑流坎收缩的溢洪道1座)。下篇为试验分析篇,包括无坎平底溢洪闸综合流量系数的确定方法、溢洪道水面线推求控制断面水深的确定方法、溢洪道泄槽弯道段设置导流墙的设计方法。

本书可供工程技术人员溢洪道工程设计使用,也可作为科研、教学人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

溢洪道水工模型试验与分析/张庆华,宋学东著. —郑州:黄河水利出版社,2012. 8

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0340 - 1

I. ①溢… II. ①张…②宋… III. ①溢洪道 - 水工模型试验 IV. ①TV651.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 200918 号

策划编辑:李洪良 电话:0371-66024331 邮箱:hongliang0013@163.com

出版社:黄河水利出版社

网址:www. yrcp. com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940, 66020550, 66028024, 66022620(传真)

E-mail: hhslebs@126. com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:11.5

字数:266千字

印数:1—1 000

版次:2012年8月第1版

印次:2012年8月第1次印刷

定价:38.00元

# 前 言

溢洪道是土石坝水库枢纽工程重要的组成部分,对工程安全起着重要的作用。溢洪道工程一般包括进水段、控制段、泄槽段、消能段和出水段,其工程设计包括溢洪道布置、水力设计、建筑物结构设计、地基及边坡设计和安全监测设计等。溢洪道水力设计是其他设计的基础,由于溢洪道水力条件的复杂性和多变性,因此《溢洪道设计规范》(SL 253—2000)规定“大型工程及条件较为复杂的中型工程,应进行水工模型试验,论证其布置及水力设计的合理性”。

作者自 20 世纪 90 年代中期开始,结合大中型水库除险加固工程,进行了近 30 座水库溢洪道水工模型试验,积累了较多的溢洪道水工模型试验资料。这些模型试验不仅验证了工程设计单位溢洪道工程设计的合理性,而且对工程设计提出了修改建议,对溢洪道工程布置和水力设计发挥了重要的作用。综观作者所做的溢洪道水工模型试验,对同类工程有许多可以借鉴,同时,也有必要对试验资料进行研究与分析,探索其规律,供溢洪道工程设计参考。

本书包括上、下两篇。上篇为模型试验实例,介绍了具有代表性的 8 座水库溢洪道水工模型试验与分析,其中大型水库 3 座、中型水库 5 座;底流(消力池)消能 3 座、挑流消能 5 座(含泄槽弯道段设置导流墙的溢洪道 1 座,挑流坎收缩的溢洪道 1 座)。下篇为试验分析篇,结合作者对溢洪道水工模型试验的研究成果,介绍了无坎平底溢洪闸综合流量系数及溢洪道水面线推求控制断面水深的确定方法、溢洪道泄槽弯道段设置导流墙的设计方法。需要说明的是,本书上篇各工程的设计简介是依据该工程的可行性研究报告或初步设计编写的,可能与建成后的工程有差别。

本书由山东农业大学张庆华、宋学东撰写,第 1~5、10、11 章由张庆华执笔,第 6~9 章由宋学东执笔,全书由张庆华统稿、定稿。山东农业大学颜宏亮、李保栋、王青、彭儒武、孙玉霞、李妮等老师参加了本书的水工模型试验工作,山东农业大学姜锡强教授在模型试验中给予了技术指导。另外,山东省水利勘测设计院、泰安市水利勘测设计研究院、临沂市水利勘测设计院、青岛市水利勘测设计研究院有限公司、山东省水利科学研究院勘察设计研究所和潍坊市水利建筑设计研究院及模型试验的工程项目建设单位等为本书水工模型试验提供了工程设计资料和支持,在此一并表示感谢。

受时间及经费所限,作者所做的溢洪道水工模型试验大都是以工程设计为目的,研究性试验成果较少,这也限制了作者向更深层次探讨,对有些问题的认识和研究还有待进一步深入。同时,受学识视野和水平所限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请同行、专家批评指正。

作 者

2012 年 5 月

## 目 录

## 上篇 模型试验

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 第 1 章 雪野水库溢洪道水工模型试验 ..... | (1)   |
| 1.1 概 述 .....             | (1)   |
| 1.2 模型设计与制作 .....         | (4)   |
| 1.3 模型测试 .....            | (6)   |
| 1.4 试验成果 .....            | (8)   |
| 1.5 结论与建议 .....           | (18)  |
| 第 2 章 光明水库溢洪道水工模型试验 ..... | (21)  |
| 2.1 概 述 .....             | (21)  |
| 2.2 模型设计与制作 .....         | (24)  |
| 2.3 模型测试 .....            | (26)  |
| 2.4 试验成果 .....            | (27)  |
| 2.5 结论与建议 .....           | (36)  |
| 第 3 章 牟山水库溢洪道水工模型试验 ..... | (38)  |
| 3.1 概 述 .....             | (38)  |
| 3.2 模型设计与制作 .....         | (40)  |
| 3.3 模型测试 .....            | (42)  |
| 3.4 试验成果 .....            | (43)  |
| 3.5 结论与建议 .....           | (59)  |
| 第 4 章 东周水库溢洪道水工模型试验 ..... | (61)  |
| 4.1 概 述 .....             | (61)  |
| 4.2 模型设计与制作 .....         | (62)  |
| 4.3 模型测试 .....            | (65)  |
| 4.4 试验成果 .....            | (67)  |
| 4.5 结论与建议 .....           | (82)  |
| 第 5 章 黄前水库溢洪道水工模型试验 ..... | (84)  |
| 5.1 概 述 .....             | (84)  |
| 5.2 模型设计与制作 .....         | (86)  |
| 5.3 模型测试 .....            | (88)  |
| 5.4 试验成果 .....            | (89)  |
| 5.5 结论与建议 .....           | (105) |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| <b>第 6 章 金斗水库溢洪道水工模型试验</b> | (107) |
| 6.1 概 述                    | (107) |
| 6.2 模型设计与制作                | (110) |
| 6.3 模型测试                   | (112) |
| 6.4 试验成果                   | (113) |
| 6.5 结论与建议                  | (122) |
| <b>第 7 章 昌里水库溢洪道水工模型试验</b> | (124) |
| 7.1 概 述                    | (124) |
| 7.2 模型设计与制作                | (127) |
| 7.3 模型测试                   | (129) |
| 7.4 试验成果                   | (130) |
| 7.5 结论与建议                  | (142) |
| <b>第 8 章 仁河水库溢洪道水工模型试验</b> | (145) |
| 8.1 概 述                    | (145) |
| 8.2 模型设计与制作                | (146) |
| 8.3 模型测试                   | (148) |
| 8.4 试验成果                   | (149) |
| 8.5 结论与建议                  | (156) |

## 下篇 试验分析

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| <b>第 9 章 无坎平底溢洪闸综合流量系数</b>      | (157) |
| 9.1 现行溢洪闸过流能力计算方法分析             | (157) |
| 9.2 试验成果与分析                     | (159) |
| 9.3 溢洪闸综合流量系数确定方法               | (161) |
| <b>第 10 章 溢洪道水面线推求控制断面水深的确定</b> | (163) |
| 10.1 问题的提出                      | (163) |
| 10.2 溢洪道闸后控制断面水深分析              | (163) |
| 10.3 溢洪道闸后控制断面水深模型试验与分析         | (164) |
| 10.4 溢洪道控制断面水深的确定方法             | (167) |
| <b>第 11 章 泄槽弯道段设置导流墙设计</b>      | (170) |
| 11.1 弯道水流的调整措施                  | (170) |
| 11.2 泄槽弯道段设置导流墙后水流改善            | (171) |
| 11.3 泄槽弯道段设置导流墙模型试验             | (173) |
| 11.4 导流墙的设计                     | (175) |
| <b>参考文献</b>                     | (178) |

# 上篇 模型试验

## 第1章 雪野水库溢洪道水工模型试验

### 1.1 概 述

根据《莱芜市雪野水库除险加固工程初步设计》，工程设计情况简介如下。

#### 1.1.1 工程概况

雪野水库位于山东省莱芜市莱城区雪野乡大冬暖村北，大汶河支流瀛汶河上游，控制流域面积444 km<sup>2</sup>，总库容2.21亿 m<sup>3</sup>，兴利库容1.112亿 m<sup>3</sup>，死库容280万 m<sup>3</sup>，是一座以防洪为主，兼顾发电、灌溉、水产养殖、工业供水等综合利用的大(2)型水库。水库枢纽工程包括主坝，副坝，溢洪道，东、西放水洞和电站等工程。

#### 1.1.2 工程等级及设计标准

##### 1.1.2.1 工程等级及建筑物级别

依据《防洪标准》(GB 50201—94)及《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL 252—2000)，雪野水库枢纽工程建筑物等别为Ⅱ等，大坝、溢洪道、放水洞等主要建筑物级别为2级，次要建筑物为3级。

##### 1.1.2.2 防洪标准

依据《防洪标准》(GB 50201—94)，雪野水库防洪标准为：正常运用(设计)洪水标准为100年一遇( $P=1\%$ )，非常运用(校核)洪水标准为5000年一遇( $P=0.02\%$ )。依据《溢洪道设计规范》(SL 253—2000)，溢洪道消能防冲标准为50年一遇洪水设计( $P=2\%$ )。

#### 1.1.3 洪水调节计算结果

雪野水库洪水调节计算结果见表1-1。

表 1-1 雪野水库洪水调节计算结果

| 洪水标准       | 库水位<br>(m) | 库容<br>(亿 m <sup>3</sup> ) | 溢洪道总<br>泄洪流量<br>(m <sup>3</sup> /s) | 出水渠水位<br>(m) | 说明                     |
|------------|------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------|------------------------|
| $P=5\%$    | 233.65     | 1.454                     | 600                                 | 212.939      | 20 年一遇及以下洪水为控泄,其余为自由泄流 |
| $P=2\%$    | 233.65     | 1.454 8                   | 2 497                               | 215.943      |                        |
| $P=1\%$    | 233.8      | 1.630 6                   | 2 567                               | 216.032      |                        |
| $P=0.05\%$ | 235.23     | 1.683 1                   | 3 312                               | 216.937      |                        |
| $P=0.02\%$ | 235.73     | 1.758                     | 3 589                               | 217.254      |                        |

#### 1.1.4 溢洪道工程设计概况

雪野水库溢洪道工程由进水渠、闸室、泄槽、消能段和出水渠五部分组成,如图 1-1 所示。

##### 1.1.4.1 进水渠

0+054.9~0+017.5 为溢洪闸前引渠,长 37.4 m,底宽为 82.5 m,控制底高程为 226.1 m,分两段。闸室段上游 15 m 为 C20 钢筋混凝土铺盖,前端长 2.0 m 通过 1:4 的斜坡与闸室底板衔接,两侧钢筋混凝土翼墙对称布置;铺盖前为长 22.4 m 的鱼嘴形曲面,半径 30 m,中心角 48°,翼墙为 M10 水泥砂浆砌方块石直墙段。

##### 1.1.4.2 闸室

0+017.5~0+000 为闸室,总长 17.5 m,闸室为正槽开敞式钢筋混凝土结构,顺水流方向在闸墩上设有检修桥、机架桥、交通桥,桩号 0+000 为闸室后沿。闸室共 8 孔,每孔净宽为 9.0 m,中墩宽 1.5 m,总宽 82.5 m。闸底板高程 226.1 m,无坎宽顶堰,平板钢质闸门控制,闸墩厚 1.5 m,中墩上、下游墩头为半圆形。闸门尺寸 9 m×7 m(宽×高),门顶高程 233.1 m。

##### 1.1.4.3 泄槽

0+000~0+119.17 为溢洪道泄槽。溢洪闸后泄槽均为钢筋混凝土护底,宽 82.5 m,泄水槽分两段,上游段长 93.6 m,底板高程由 226.1 m 降至 225.5 m, $i=1/150$ ;下游段为陡坡段,长 25.57 m, $i=1/4$ 。边墙为混凝土重力式挡土墙。

##### 1.1.4.4 消能段

0+119.17~0+129.47 为挑流鼻坎消能段,总长 10.3 m。挑流鼻坎为连续式钢筋混凝土结构,下设灌注桩基础,反弧半径 11.80 m,挑射角 15°。

##### 1.1.4.5 出水渠

出水渠全长 600 m, $i=1/120$ ,左、右岸均为混凝土护岸。平面布置为:中心线自鼻坎后 2.0 m 为直线段,0+131.47~0+244.47 为弯道段,中泓线沿半径为 117.5 m、转角为 58.43°的弧线转向西偏南。左岸 0+129.47~0+139.47 为直线段,0+139.47~0+248.69 为弯道段,半径 146.78 m,中心角 58.15°,后为直线段;右岸 0+129.47~0+271.6

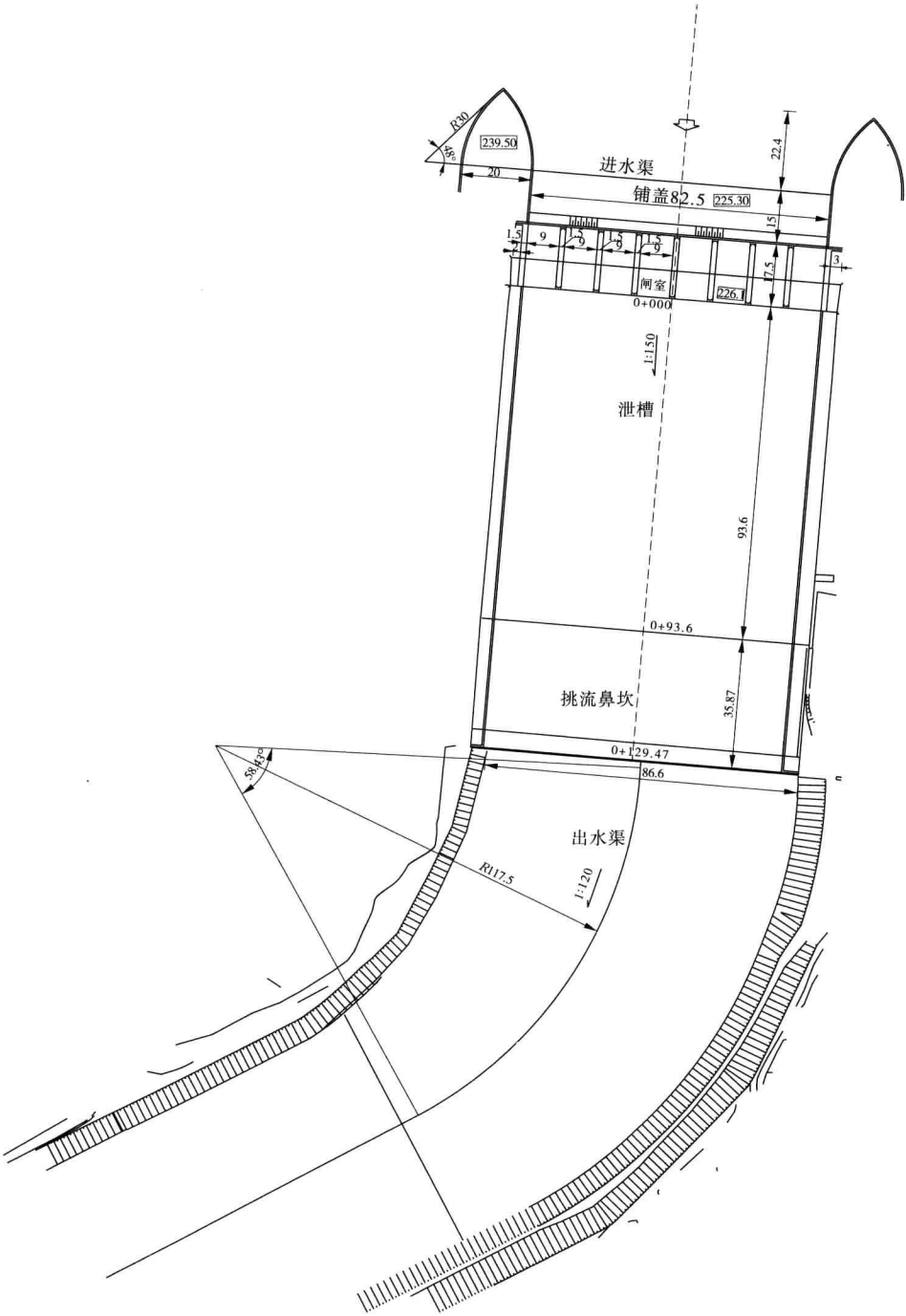


图 1-1 雪野水库溢洪道平面布置图 (单位:m)

为弯道段,半径 115.06 m,中心角  $50.2^\circ$ ,后为直线段。出水渠边墙:左岸圆弧段边坡 1:0.1,右岸圆弧段边坡 1:1,均用混凝土护岸;圆弧后直线段边坡均为 1:1,用浆砌块石护坡。

现状挑流坎后 46 m、宽 70 m 范围内为高程比坎顶略低的裸露岩石。

## 1.2 模型设计与制作

### 1.2.1 模型试验的目的、任务和范围

#### 1.2.1.1 模型试验目的

通过水工模型试验,验证溢洪道系统的泄流能力、水流流态及消能效果,并对存在的问题提出修改方案,为溢洪道加固改造提供设计依据。

#### 1.2.1.2 模型试验任务

模型试验的任务为:①验证水库水位—溢洪闸泄量关系;②测试溢洪闸过流综合流量系数;③验证原挑流坎高程、反弧半径和挑射角的合理性,提供宣泄各洪水频率时的下泄水流挑射距离和可能冲刷坑的深度和范围,以及对两岸的冲刷影响;④通过试验,确定上游翼墙的高度及长度,以保证两侧坝坡不受冲刷,并有较好的人流条件;⑤提供泄槽水位—流量关系曲线,以此确定两岸翼墙的墙顶高程;⑥提出各频率洪水时溢洪道系统的水面线、流速分布等;⑦提供闸门控制运用时的开启方式、开度、闸前水位关系;⑧对设计方案提出合理的修改意见。

#### 1.2.1.3 模型试验范围

根据本工程水工模型试验任务,结合本工程实际情况,本次水工模型试验的范围为:雪野水库溢洪道闸前进水渠开始到部分出水渠,主要建筑物包括闸室、泄槽、挑流鼻坎。

### 1.2.2 模型设计

#### 1.2.2.1 相似准则

本模型试验主要研究溢洪闸过水能力、溢洪道水流流态和消能情况。根据水流特点,为重力起主要作用的水流。因此,本模型试验按重力相似准则进行模型设计,同时保证模型水流流态与原型水流流态相似。

#### 1.2.2.2 模型类别

根据模型试验任务和模型试验范围,本模型选用正态、定床、部分动床、整体模型,其中挑流冲坑段为动床模型。

#### 1.2.2.3 模型比尺

根据模型试验范围和整体模型试验要求,结合试验场地和设备供水能力,选定模型长度比尺  $L_r = 60$ ,其他各物理量比尺为

$$\text{流量比尺: } Q_r = 60^{2.5} = 27\,885.5;$$

$$\text{流速比尺: } V_r = 60^{1/2} = 7.746;$$

$$\text{糙率比尺: } n_r = 60^{1/6} = 1.979;$$

时间比尺:  $T_r = 60^{1/2} = 7.746$ 。

#### 1.2.2.4 模型布置

模型试验在专用的模型试验池内进行。根据工程平面布置图和各部尺寸,按 1:60 比尺将工程模型布置在模型池内。模型闸室及泄槽宽 137.5 cm,闸室长 29.17 cm,泄槽长 198.62 cm,挑流坎长 17.17 cm,出水渠长 270 cm。

#### 1.2.2.5 模型材料选用

模型材料根据原型工程实际材料和糙率,按糙率比尺选用。原型铺盖、闸室、泄槽及挑流坎等混凝土或钢筋混凝土工程,糙率 0.015,模型用有机玻璃板。原型浆砌块石工程,糙率 0.022 5,模型用塑料板。原型出水渠渠底,糙率 0.030,模型用水泥砂浆抹面。

#### 1.2.2.6 冲坑段

挑流坎下游冲坑段模型按动床设计,用天然散粒体模拟由砂砾石组成的原型河床,砾石粒径按下式计算

$$v = KD^{0.5} \quad (1-1)$$

式中  $v$ ——不冲流速, m/s;

$K$ ——系数,为 5~7,取 6 计算;

$D$ ——粒径, m。

按式(1-1)计算的为原型砾石粒径,模型用砾石粒径应根据比尺换算。

根据《莱芜市雪野水库溢洪道工程地质勘探报告》,挑流鼻坎下游地质情况为:右岸高程 219~221.1 m 为强风化混合花岗片麻岩,裂隙发育;高程 192~219 m 为中风化层;高程 192 m 以下为微风化岩石。挑流坎中左岸,表层 1~2 m 为强风化层,高程 198.3~209.2 m 为中风化混合花岗片麻岩,裂隙发育;高程 198.3 m 以下为微风化岩石。

经计算,强风化层模型砾石粒径为 16.7~22.6 mm,中风化层模型砾石粒径为 22.6~41.8 mm,微风化层模型砾石粒径为 41.8~61.2 mm。

#### 1.2.2.7 模型流量

根据流量比尺及原型流量,计算得到各洪水标准模型流量见表 1-2。

表 1-2 模型流量

| 洪水标准         | 原型流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 模型流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 闸门运用 |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|------|
| $P = 5\%$    | 600                           | 0.021 5                       | 控制泄量 |
| $P = 2\%$    | 2 497                         | 0.089 5                       | 闸门全开 |
| $P = 1\%$    | 2 567                         | 0.092                         | 闸门全开 |
| $P = 0.05\%$ | 3 312                         | 0.118 8                       | 闸门全开 |
| $P = 0.02\%$ | 3 589                         | 0.128 7                       | 闸门全开 |

#### 1.2.3 模型制作

为确保水工模型试验精度,模型制作严格按模型设计和《水工(常规)模型试验规程》(SL 155—95)的要求进行。

闸室段、泄槽和挑流段由木工按模型设计尺寸整体制作,精度控制在误差  $\pm 0.2 \text{ mm}$  以内。制作完成后在模型池内进行安装,高程误差控制在  $\pm 0.3 \text{ mm}$  以内。

其他段在模型池内现场制作。制作时,模型尺寸用钢尺量测,建筑物高程误差控制在  $\pm 0.3 \text{ mm}$  以内。

地形的制作先用土夯实,上面用水泥砂浆抹面  $1 \sim 2 \text{ cm}$ 。地形高程误差控制在  $\pm 2.0 \text{ mm}$  以内,平面距离误差控制在  $\pm 5 \text{ mm}$  以内。

冲坑段按照散粒体粒径计算结果,强风化层选用粒径  $10 \sim 20 \text{ mm}$  的石子,中风化层选用粒径  $20 \sim 40 \text{ mm}$  的石子,微风化层选用粒径  $40 \sim 60 \text{ mm}$  的石子,石子分层铺设。

## 1.3 模型测试

### 1.3.1 模型测试方案

根据模型试验任务,本次模型试验设计了以下测试方案。

#### 1.3.1.1 鼻坎挑射角确定

在挑流坎后岩石不开挖,洪水标准  $5\%$ 、 $2\%$  的情况下测试以下方案:

(1)鼻坎挑射角  $15^\circ$  (原设计情况)。测试挑射距离、冲坑后出水渠部分断面水深、水流流速,观察鼻坎水流、出水渠水流情况。

(2)鼻坎挑射角  $19^\circ$ 。鼻坎挑射角  $19^\circ$  时,鼻坎高程  $218.41 \text{ m}$ ,挑流坎后移  $0.67 \text{ m}$ 。测试挑射距离、冲坑后出水渠部分断面水深、水流流速,观察鼻坎水流、出水渠水流情况。

(3)鼻坎挑射角  $21.5^\circ$ 。鼻坎挑射角  $21.5^\circ$  时,鼻坎高程  $218.59 \text{ m}$ ,挑流坎后移  $1.16 \text{ m}$ 。测试挑射距离、冲坑后出水渠部分断面水深、水流流速,观察鼻坎水流、出水渠水流情况。

#### 1.3.1.2 起挑流量

根据确定的挑流鼻坎挑射角,控制水库水位为兴利水位(起调水位)  $232.8 \text{ m}$ ,测试起挑流量。

根据起挑流量情况下的挑距,确定坎后岩石开挖范围。

#### 1.3.1.3 水库水位—溢洪闸泄量关系

量测不同水库水位下溢洪闸泄量。

#### 1.3.1.4 溢洪闸过流综合流量系数

以闸前  $0-032.5$  为测试断面,测试断面水深、流速,用宽顶堰流量公式计算溢洪闸过流综合流量系数。

#### 1.3.1.5 溢洪道水深、水位、流速、冲坑参数测试

挑射角  $19^\circ$ ,鼻坎后岩石开挖至  $214.0 \text{ m}$ ,测试以下方案:

(1) $P=5\%$ ,溢洪闸泄洪  $600 \text{ m}^3/\text{s}$ ,库水位  $233.65 \text{ m}$ 。模型放水流量  $0.0215 \text{ m}^3/\text{s}$ ,控制库水位达到设计要求,量测闸门开启高度及各断面的水深、挑距、冲坑深度和范围。

(2) $P=2\%$ ,溢洪闸泄洪  $2497 \text{ m}^3/\text{s}$ 。模型放水流量  $0.0895 \text{ m}^3/\text{s}$ ,闸门全开,量测水库水位及各断面的水深、挑距、冲坑深度和范围。

(3)  $P=1\%$  ,溢洪闸泄洪  $2\,567\text{ m}^3/\text{s}$ 。模型放水流量  $0.092\text{ m}^3/\text{s}$ , 闸门全开, 量测水库水位及各断面的水深、流速、挑距、冲坑深度和范围。

(4)  $P=0.05\%$  ,溢洪闸泄洪  $3\,312\text{ m}^3/\text{s}$ 。模型放水流量  $0.118\,8\text{ m}^3/\text{s}$ , 闸门全开, 量测相应库水位及各断面的水深、流速、挑距、冲坑深度和范围。

(5)  $P=0.02\%$  ,溢洪闸泄洪  $3\,589\text{ m}^3/\text{s}$ 。模型放水流量  $0.128\,7\text{ m}^3/\text{s}$ , 闸门全开, 量测相应库水位及各断面的水深、流速、挑距、冲坑深度和范围。

1.3.2 断面水深及水位测量

1.3.2.1 测试断面设计及垂线布置

根据模型试验任务, 本试验共设计了 16 个测试断面, 弯道处设计了左右岸边、导流墙左右四条测垂线, 其余断面设计了左中右三条测垂线, 测试断面见表 1-3。

表 1-3 测试断面设计

| 序号  | 桩号       | 位置        | 底高程(m) |
|-----|----------|-----------|--------|
| 1   | 0-054.9  | 闸前进水渠     | 225.30 |
| 2   | 0-032.5  | 闸前铺盖      | 225.60 |
| 3   | 0-017.5  | 闸室前沿      | 226.10 |
| 4   | 0+000    | 闸室末端      | 226.10 |
| 5   | 0+030    | 泄槽        | 225.90 |
| 6   | 0+060    | 泄槽        | 225.70 |
| 7   | 0+093.6  | 泄槽        | 225.50 |
| 8   | 0+105    | 泄槽        | 222.65 |
| 9   | 0+125.91 | 挑流反弧底点    | 217.83 |
| 10* | 0+129.75 | 挑流坎       | 218.41 |
| 11  | 0+160    | 出水渠弯道、冲坑段 | 214.00 |
| 12  | 0+190    | 出水渠弯道     | 210.95 |
| 13  | 0+220    | 出水渠弯道     | 210.70 |
| 14  | 0+250    | 出水渠       | 210.36 |
| 15  | 0+280    | 出水渠       | 210.18 |
| 16  | 0+310    | 出水渠       | 209.96 |

注: \* 该断面相应数值为挑射角  $19^\circ$  后的情况(原桩号为 0+129.08, 鼻坎高程为 218.20 m)。

1.3.2.2 水深测量

水深测量是测量各垂线的水深。

1.3.2.3 水位测量

测点水位 = 测点水深 + 河底高程。

### 1.3.3 断面流速测量

采用精测法进行断面流速测量。

#### 1.3.3.1 测点位置

每条垂线布设 1~3 个测点。当水深小于 2 cm 时,只测 1 点流速;当水深为 2~5 cm 时,测 2 点流速;当水深大于 5 cm 时,测 3 点流速。测点的位置为:

第 1 点距水面  $0.2h$  ( $h$  为该垂线水深,下同);

第 2 点距水面  $0.6h$ ;

第 3 点距水面  $0.8h$ 。

#### 1.3.3.2 测点流速

将流速仪放在测垂线上,测量各点的流速。

#### 1.3.3.3 垂线平均流速

各垂线的平均流速按以下方法计算:

一点法:平均流速  $= V_{0.6}$ ;

二点法:平均流速  $= (V_{0.2} + V_{0.8})/2$ ;

三点法:平均流速  $= (V_{0.2} + V_{0.6} + V_{0.8})/3$ 。

#### 1.3.3.4 测试要求

为确保测试精度,减少测量误差,每个测点测试 3 次,取平均值作为测试数值。

### 1.3.4 测试设备

#### 1.3.4.1 流量控制设备

入库洪水采用矩形量水堰控制流量。

#### 1.3.4.2 水深测试设备

水深测量采用 40 cm、60 cm 测针,测针精度为 0.1 mm。

#### 1.3.4.3 流速测试设备

流速测量采用 CYS-测速仪,用下式计算测点流速:

$$V = KN + C$$

式中  $V$ ——测点流速, cm/s;

$N$ ——单位时间内叶轮转数;

$K, C$ ——常数。

$K, C$  与流速传感器旋浆叶轮直径、反光面个数有关。该仪器也可从显示器上直接读出流速数值。采样时间一般为 10 s,最小起动流速为 2.5 cm/s,最大测量流速为 2 100 cm/s。

## 1.4 试验成果

本次模型试验取得了以下试验成果。

1.4.1 闸门开启高度及水库水位

经测试,各种标准洪水闸门开启高度及水库水位如下:

- (1) $P=5\%$ 。闸门开启高度 1.15 m,水库水位 233.65 m。
- (2) $P=2\%$ 。闸门全开,水库水位 233.78 m。
- (3) $P=1\%$ 。闸门全开,水库水位 233.936 m。
- (4) $P=0.05\%$ 。闸门全开,水库水位 235.166 m。
- (5) $P=0.02\%$ 。闸门全开,水库水位 235.652 m。

1.4.2 水库水位—溢洪闸泄量关系

不同水库水位下溢洪闸泄量见表 1-4、图 1-2。

1.4.3 溢洪闸综合流量系数

闸门全开、溢洪闸不同泄量情况下,溢洪闸综合流量系数测试结果见表 1-5。

表 1-4 水库水位—溢洪闸泄量关系

| 序号 | 水库水位(m) | 溢洪闸泄量( $\text{m}^3/\text{s}$ ) |
|----|---------|--------------------------------|
| 1  | 227.228 | 101.5                          |
| 2  | 228.284 | 328.6                          |
| 3  | 229.016 | 525.7                          |
| 4  | 229.874 | 787.2                          |
| 5  | 230.810 | 1 129.8                        |
| 6  | 231.614 | 1 447.7                        |
| 7  | 231.740 | 1 489.4                        |
| 8  | 232.172 | 1 687.1                        |
| 9  | 232.490 | 1 830.8                        |
| 10 | 232.784 | 1 974.2                        |
| 11 | 233.222 | 2 196.5                        |
| 12 | 233.684 | 2 460.3                        |
| 13 | 233.780 | 2 497.0                        |
| 14 | 233.936 | 2 567.0                        |
| 15 | 234.212 | 2 727.4                        |
| 16 | 234.656 | 2 973.5                        |
| 17 | 235.166 | 3 312.0                        |
| 18 | 235.652 | 3 589.0                        |
| 19 | 235.880 | 3 690.5                        |

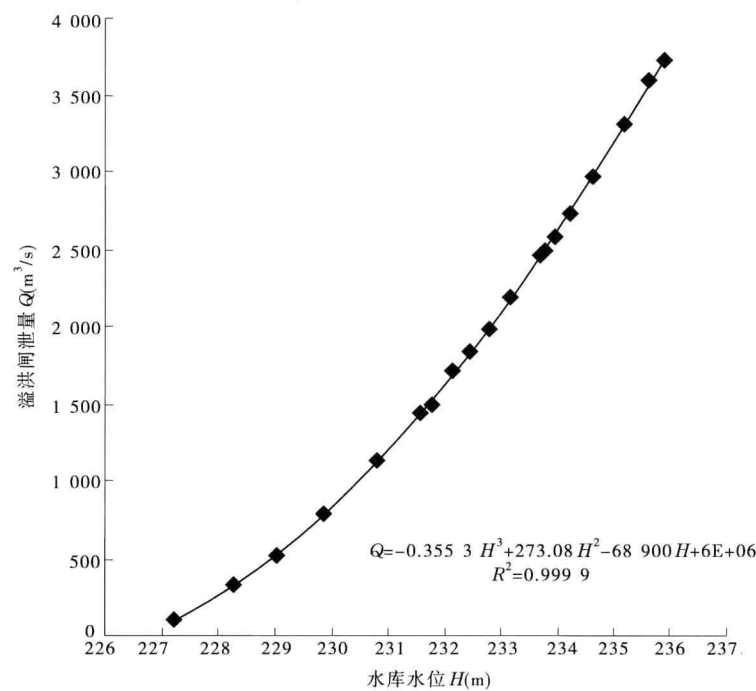


图 1-2 水库水位—溢洪闸泄量关系曲线

表 1-5 溢洪闸综合流量系数测试结果

| 序号 | 水库水位<br>(m) | 溢洪闸泄量<br>( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 堰上水深<br>(m) | 测试断面流速<br>( $\text{m}/\text{s}$ ) | 综合流量<br>系数 |
|----|-------------|------------------------------------|-------------|-----------------------------------|------------|
| 1  | 227.228     | 101.5                              | 0.990       | 0.87                              | 0.305      |
| 2  | 228.284     | 328.6                              | 1.968       | 1.79                              | 0.331      |
| 3  | 229.016     | 525.7                              | 2.608       | 2.34                              | 0.336      |
| 4  | 229.874     | 787.2                              | 4.298       | 2.65                              | 0.353      |
| 5  | 230.810     | 1 129.8                            | 4.070       | 3.06                              | 0.366      |
| 6  | 231.614     | 1 447.7                            | 4.852       | 3.44                              | 0.357      |
| 7  | 231.740     | 1 489.4                            | 4.862       | 3.41                              | 0.367      |
| 8  | 232.172     | 1 687.1                            | 5.338       | 3.65                              | 0.358      |
| 9  | 232.490     | 1 830.8                            | 5.570       | 3.83                              | 0.362      |
| 10 | 232.784     | 1 974.2                            | 5.882       | 3.94                              | 0.359      |
| 11 | 233.222     | 2 196.5                            | 6.226       | 4.12                              | 0.365      |
| 12 | 233.684     | 2 460.3                            | 6.804       | 4.30                              | 0.358      |
| 13 | 233.780     | 2 497.0                            | 6.903       | 3.76                              | 0.372      |
| 14 | 233.936     | 2 567.0                            | 7.003       | 4.31                              | 0.359      |
| 15 | 234.212     | 2 727.4                            | 7.204       | 4.37                              | 0.366      |
| 16 | 234.656     | 2 973.5                            | 7.718       | 4.51                              | 0.360      |
| 17 | 235.166     | 3 312.0                            | 8.130       | 4.79                              | 0.366      |
| 18 | 235.652     | 3 589.0                            | 8.520       | 4.76                              | 0.374      |
| 19 | 235.880     | 3 690.5                            | 8.776       | 4.58                              | 0.375      |

表 1-5 中综合流量系数根据宽顶堰公式按下式推求

$$m = \frac{Q}{BH_0^{3/2}\sqrt{2g}}$$

(1-2)

式中  $m$ ——溢洪闸综合流量系数；  
 $Q$ ——溢洪闸过流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；  
 $B$ ——溢洪闸闸室（堰）净宽，为 72 m；  
 $H_0$ ——堰上水头， $H_0 = h + \frac{v^2}{2g}$ ；  
 $h$ ——测试断面（0-032.5）水深 -0.5 m（溢洪闸底板与测试断面高差）；  
 $v$ ——测试断面（0-032.5）流速， $\text{m/s}$ 。

1.4.4 不同鼻坎挑射角挑距与出水渠水流情况

在挑流坎后岩石不开挖，洪水标准 5%、2% 情况下，鼻坎挑射角 15°、19°、21.5°挑距测试结果见表 1-6 ~ 表 1-8。

表 1-6 挑距测试结果（挑射角 15°，现状情况）

| 洪水标准      | 挑距（m） |       |      |       |      |
|-----------|-------|-------|------|-------|------|
|           | 左     | 左 1/2 | 中间   | 右 1/2 | 右    |
| $P = 5\%$ | 17.8  | 16.2  | 16.8 | 12.0  | 10.8 |
| $P = 2\%$ | 18.0  | 18.0  | 18.0 | 18.0  | 19.2 |

注：挑距量测为挑流坎外缘至水舌入水面外缘处，下同。

表 1-7 挑距测试结果（挑射角 19°，现状情况）

| 洪水标准      | 挑距（m） |       |      |       |      |
|-----------|-------|-------|------|-------|------|
|           | 左     | 左 1/2 | 中间   | 右 1/2 | 右    |
| $P = 5\%$ | 17.1  | 17.4  | 19.8 | 14.4  | 10.8 |
| $P = 2\%$ | 21.0  | 21.0  | 21.0 | 21.0  | 21.6 |

表 1-8 挑距测试结果（挑射角 21.5°，现状情况）

| 洪水标准      | 挑距（m） |       |      |       |      |
|-----------|-------|-------|------|-------|------|
|           | 左     | 左 1/2 | 中间   | 右 1/2 | 右    |
| $P = 5\%$ | 21.0  | 20.4  | 21.6 | 18.0  | 18.0 |
| $P = 2\%$ | 27.0  | 27.0  | 27.0 | 27.0  | 25.8 |

在挑流坎后岩石不开挖，洪水标准 5%、2% 情况下，鼻坎挑射角 15°、19°、21.5°出水渠冲坑后部分断面水深、水位、流速测试结果见表 1-9 ~ 表 1-14。