

弯曲溢洪道多级跌水与底流复合消能研究

董玉莲, 刘亚坤, 孙洪亮, 周 乐

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 弯曲溢洪道改扩建工程常需经过模型试验研究确定其消能优化方案, 针对汤河水库除险加固工程改建方案中弯曲泄槽段急流冲击波及消能不充分等问题, 通过水力学模型试验研究, 推荐采用多级跌水与底流复合消能方式。在弯曲段一级消力池入口及出口设置斜向高低坎, 二级消力池入口加消力坎、尾坎后设置防冲槽, 形成多级跌水、两级消力池、消力坎、防冲槽等不同消能元件的组合, 不仅有效利用了地形, 而且改善了泄流流态, 妥善解决了消能防冲问题。

关键词: 消力坎; 多级消能; 弯曲溢洪道; 模型试验; 汤河水库

中图分类号: TV651.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2013)05—0001—04

Research on Composite Energy Dissipation System of Multi-stage Plunge with Bottom Flow for Curved Spillway

DONG Yu-lian, LIU Ya-kun, SUN Hong-liang, ZHOU Le

(Faculty of Construction Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The model experiment is widely used as a key method to determine the reconstruction scheme of curved spillway. With regard to the project problems as the torrent shock wave in curved chute and flood discharge energy dissipation in the reconstruction scheme of Tanghe Reservoir, a composite energy dissipation system of multi-stage plunge with bottom flow is recommended based on model-test results. The scheme is composed of the first-stage stilling basin with two high-low slope banks at the inlet and outlet in the curved chute and the second-stage stilling basin which has a baffle sill at the inlet and an anti-scour trench behind the baffle wall. The combination of various dissipators, including multi-stage plunge, two-stage stilling basin, baffle sill and anti-scour trench, could not only make full use of the terrain, but also improve the flow condition, thus properly solving the energy dissipation and scour prevention of the spillway.

Keywords: baffle sill; multi-stage dissipation; curved spillway; model experiment; Tanghe Reservoir

由于工程地形条件及枢纽布置的要求, 溢洪道常被设计成曲线型弯道形式。但是, 急流通过弯道时, 由于边墙的转弯影响水的流向, 产生冲击波^[1], 冲击波横过槽身, 左右反射, 致使水面横向水面差增加、流态恶化。因此, 在工程设计或者已建工程改扩建时, 采取简单有效的工程措施消减弯道急流冲击波的影响, 对水库及溢洪道的安全运行至关重要。

目前, 在改善弯道水流流态、消减急流冲击波的工程实践方面, 针对具体工程, 多采用一种或几种技术措施联合运用的方式^[2-4]。尽管方法各异, 其基本原理却可大体归于两类: 一类是施加侧向力, 即采

用工程措施, 向弯道水流施加与离心力相平衡的作用力, 以达到消除扰动的目的。另一类是干扰处理, 即在曲线的起点和终点, 引入一种与原来扰动大小相等、相位相反的反扰动, 来消除原来扰动影响。具体有渠底超高法、复曲线法、弯曲导流板法、斜槛法等。事实上, 许多弯曲溢洪道改扩建工程都是经过模型试验研究才最终确定了消减急流冲击波的工程技术措施。

本文针对汤河水库改建工程, 通过理论分析及模型试验研究, 提出了弯曲溢洪道多级跌水与底流复合消能的消能方式。

收稿日期: 2013-01-21

修稿日期: 2013-03-17

基金项目: 国家自然科学基金“灾害性天气暴雨洪水过程演化与防洪分类调度方法研究”(51279021); 国家自然科学基金“基于风险分析的跨流域引水环境下水库汛期水位实时调度多目标决策研究”(51079015)

作者简介: 董玉莲(1987—), 女, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为工程水力学。

通讯作者: 刘亚坤(1968—), 女, 黑龙江讷河市人, 教授, 博导, 主要从事工程水力学研究。

1 工程概况及原试验方案存在问题

汤河水库位于辽宁省辽阳市弓长岭区境内,是一座以防洪、工业和供水为主,兼顾灌溉、发电、养鱼等综合利用的大(2)型水利枢纽。水库主要枢纽建筑物有土坝、溢洪道、输水洞、水电站、引水建筑物等五部分。其中,溢洪道建于右岸,为开敞式实用堰,堰顶高程 101.3 m,最大泄洪流量为 $2\ 713\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

溢洪道包括进水渠、控制段、泄槽、消能段、尾渠等五部分,总长 1 239.309 m。其平面布置见图 1,其

中 0-223.845 m~0-063.768 m 为进口引渠段直段,轴线 0-063.768 m~0-011.764 m 为转弯段,转弯半径 110 m,转角 27° ,底宽约 40 m。0-011.764 m~0+213.643 m(引渠段、控制段、泄槽段)为直段,0+213.643 m~0+358.712 m 为转弯段,转弯半径 210 m,转角 39.58° ,底宽为 31.19 m~43.25 m。在 0+108.00 m~0+320.60 m 段设 5 级跌坎。轴线 0+358.712 m~0+728.247 m(消能段、尾渠段)为直段,0+728.247 m~0+803.794 m 为转弯段,转弯半径 220 m,转角 20° 。以下至 1+015.455 m 尾渠段结束,底宽为 32.82 m~170.36 m。

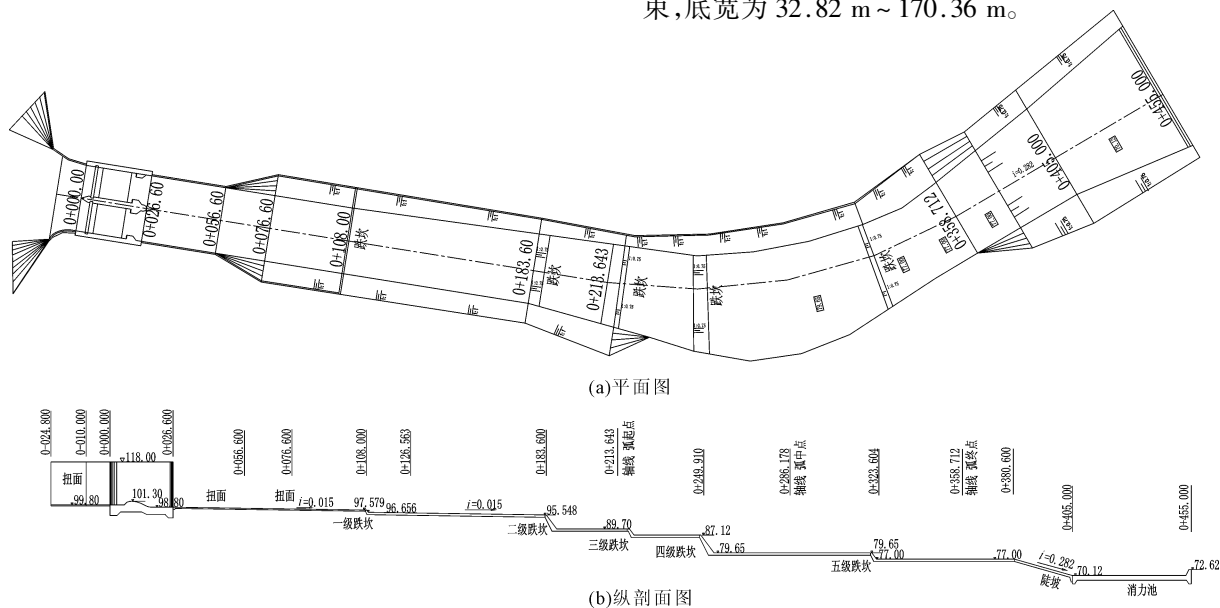


图 1 溢洪道布置图(单位:m)

本工程校核洪水频率 $P = 0.01\%$,水位为 115.96 m,泄洪流量 $Q = 2\ 707\ \text{m}^3/\text{s}$;设计洪水频率 $P = 1\%$,水位为 111.46 m,泄洪流量 $Q = 1\ 652\ \text{m}^3/\text{s}$;消能防冲设计洪水频率 $P = 2\%$,水位为 110.83 m,泄洪流量 $Q = 1\ 519\ \text{m}^3/\text{s}$ 。根据理论分析及水流运动的相似原理,按重力相似原则^[5]进行模型设计,长度比尺 $L_r = 50$ 。

汤河水库除险加固改建工程采用五级跌水结合底流扩散式消能池方案(布置图见图 1),其中包含弯曲段、陡坡段等,地形条件较复杂。模型试验结果^[6]表明,由于溢洪道中部的弯道作用,水流沿右岸形成斜水跃,弯道右侧水深壅高、左侧水深降低,水流极不对称。例如校核水位下,弯道内桩号 0+320.60 m 断面左侧墙附近水深仅为 1.25 m,右侧墙附近水深达 13.7 m,两者相差 10.96 倍。

水流过弯道后,向左岸偏移,消力池内水流主流集中在左岸,对下游左岸冲刷极为严重,同时由于沿程消能不充分及消力池深度不够,小水位($P = 1\%$ 以下洪水)时,消力池内形成远驱式水跃,水跃位置

靠近消力池出口,且明显偏于左岸,在较大水位时均形成挑流。

依据原方案试验结果,解决溢洪道消能防冲问题的关键:一是解决弯曲陡槽段水流横向不均匀问题,使得消力池内流态平稳,水深及流速趋于均匀分布;二是解决消能不充分问题,为各级跌水下跌水舌提供足够厚度的水垫层,并使下游扩散式消力池内出现完整水跃,满足下游河道的消能防冲要求。

2 试验优化方案

2.1 弯曲陡槽段试验优化

为了消除或减轻弯道内冲击波的影响,本试验拟在弯曲陡槽段上设置斜向高、低坎^[7],改变弯道进口消力坎的绝对高程以调节弯道段上游的水深,改变弯道出口消力坎的绝对高程调节消力池内水跃的淹没程度。分析可知,汤河水库溢洪道上游溢流堰堰顶至弯道段入口落差达 11.6 m,弯曲陡槽段进口处流速较大,为了改善进入弯道的水流流态,还应设法降低弯道进口断面的流速。

经多方案试验比较后,选定溢流堰下游与弯曲陡槽段消能优化方案为:

(1) 在第三级跌水后平台末端(桩号 0+244.60 m)处设置一道右高左低(面向下游,下同)的消力坎,在第四级跌水后平台末端(桩号 0+316.60 m)处设置一道右低左高的消力坎,两道斜向高、低坎之间形成弯曲段第一级消力池,如图 2 所示。跌水式底流消能池^[8]消能机理类似于挑跌流式水垫塘,水流在消力坎作用下形成稳定的强迫水跃,跌落在消力池内水垫上,水流在池内不断扩散,通过强烈旋滚和紊动消耗大部分能量,流速降低,消能效果良好。

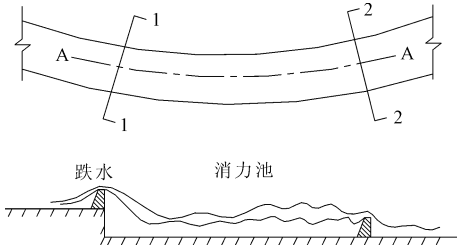


图 2 弯曲陡槽段一级消力池示意图

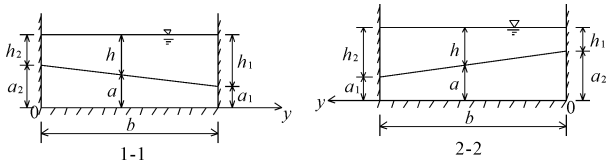


图 3 弯曲陡槽段断面图

① 1-1 断面消力坎的设计(见图 3)

a_1 的选择应使上游的流速满足控制要求; a_2 由方程(1)(2) 联解确定:

$$Q = (a_1 + h_1) \times b \times v \quad (1)$$

$$Q = m \sqrt{2g} \int_0^b (h_1 + a_1 - a_2 + \frac{a_2 - a_1}{b} y)^{1.5} dy \quad (2)$$

其中: v 为上游来流流速; $a_2 > a_1$,保证入池水面横向基本相等,其目的是消除一般弯道中的横向水面坡降,使得入池水深趋于均匀。

② 2-2 断面消力坎的设计(见图 3)

$$Q = m \sqrt{2g} \int_0^b (h_1 + a_1 - a_2 + \frac{a_2 - a_1}{b} y)^{1.5} dy \quad (3)$$

1-1 断面水舌入池 F_{r1}, h_c :

$$a_1 + h_2 \approx \frac{h_c}{2} (\sqrt{1 + 8F_{r1}^2} - 1) \quad (4)$$

第一级消力池的尺寸由以上方程计算得出。

(2) 为降低弯道进口断面流速,改善第一级消力池流态,在桩号 0+209.60 m 处设置一道高 2.50 m 的横向消力坎。从上游到下游,依次将以上三道消力坎称为坎一、坎二和坎三。三坎平面布置及尺寸分别如图 4、图 5 所示。



图 4 优化方案布置图

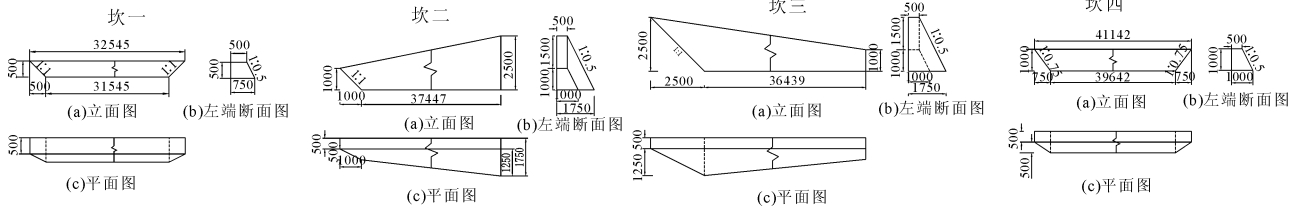


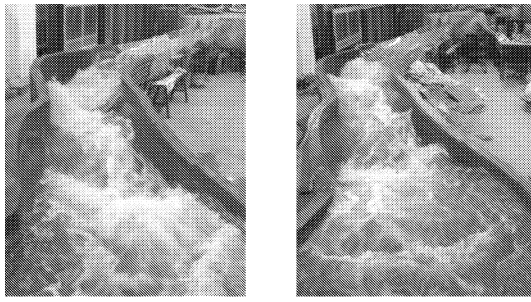
图 5 坎一~坎四布置图

2.2 二级消力池体型优化及下游消能防冲设计

加三坎后,弯曲陡槽段流态大为改善,但是由于陡坡段末端后紧接二级消力池,校核水位下,入池流速达 13.55 m/s,小水位($P = 2\%$ 以下洪水),消力池内均能形成完整水跃,但校核洪水位及水位 117.86 m 时,在消力池内没有水跃形成,泄流撞击消力池尾坎后,直接跌向下游渠道,消能效果较差。

为了增加二级消力池的消能率,满足消能防冲要求,根据已有工程经验和试验优化,将二级消力池延长 20 m,并在二级消力池入口(桩号 0+405.00

m)布置一道横向消力坎,以下称为坎四(见图 5),形成了入口带消力坎的扩散式底流二级消力池。此时,校核水位下二级消力池出口中部流速仍达 9.28 m/s,对下游河道冲刷较严重。为了进一步降低消力池出口流速,减轻高速水流对下游渠道的冲刷,试验初拟在消力池尾坎后设置防冲槽,采用美国农业研究所(ARS)对 SAF 型消力池下游防冲抛石体的设计准则计算,防冲槽抛石顶面与消力池尾坎顶面齐平(见图 6)。



(a)原方案

(b)优化后

图 6 校核水位下,溢洪道流态对比

抛石直径 D_{50} 、 L_s 与 F 的关系如下:

$$\frac{D_{50}}{h_1} > \left(\frac{F + 4.0}{10.2} \right)^{3.33}, \frac{L_s}{h_1} = 4.5F^{[9]} \quad (5)$$

式中: h_1 为消力池入口水流收缩断面水深; F 为收缩断面的弗洛德数。计算得,抛石直径为 75 cm,抛石区最小长度为 37.59 m,本方案采用 39.0 m。

3 优化方案消能效果评价

3.1 优化前后溢洪道流态对比

试验表明,在各泄流工况下 ($P = 2\% \sim 0.01\%$),受弯曲段两道斜向高、低坎的分流和调整作用,入池水流向弯道左岸偏移,出口水流向右岸偏移,弯曲陡槽段各断面水深和流速分布较原方案明显改善,见表 1、表 2。增设坎一后,进一步降低弯道进口断面流速,水流与第二道消力池内水流衔接良好,既避免了通常底部横向加高,也消除了消力池上游大部分机械能,减轻了下流的消能负担。

表 1 优化前后一级消力池水深对比

洪水频率	位置	原方案水深/m			优化后水深/m		
		入口	中部	出口	入口	中部	出口
0.01%	左	3.80	2.70	1.25	3.50	8.25	6.05
	中	3.45	5.00	3.75	4.75	10.00	7.50
	右	2.35	9.75	13.70	4.20	11.80	13.50

表 2 优化前后一级消力池流速对比

洪水频率	位置	原方案流速/($m \cdot s^{-1}$)			优化后流速/($m \cdot s^{-1}$)		
		入口	中部	出口	入口	中部	出口
0.01%	左	16.21	10.23	10.40	17.28	2.94	6.09
	中	16.06	15.79	12.00	14.98	6.33	7.73
	右	17.56	15.25	15.98	14.64	10.49	9.92

二级消力池入口增设坎四后,起到了挑射水流、强迫形成水跃的作用,消能更充分。在设计水位以下洪水时,消力池入口水流直接被挑起与消力池内水流平顺衔接,池内流态平稳,出口流速均匀;校核

水位时在消力池内形成水跃,水跃位置距出口 30 m 左右,消能效果较好;水位 117.86 m 时,消力池内没有形成水跃,水流直接冲到消力池末端尾坎。

设置防冲槽后,各水位下消力池上游的流态并没有变化。50 年一遇洪水位时,消力池内流态没有明显变化,消力池出口流速降低 0.3 m/s 左右,防冲槽冲深为 2 m;设计洪水位时,防冲槽冲深为 2.5 m,运行良好;校核水位时,防冲槽冲深严重,抛石大部分堆积在防冲槽后部,明显抬高消力池内水位,使得水跃位置前推 30 m 左右,消力池出口流速降低 1 m/s 左右。各水位下二级消力池水深、流速见表 3。

表 3 二级消力池水深、流速表

洪水频率	位置	水深/m			流速/($m \cdot s^{-1}$)		
		入口	中部	出口	入口	中部	出口
0.01%	左	3.75	9.00	6.50	15.52	2.42	1.48
	中	3.90	9.50	8.05	16.51	5.02	8.76
	右	2.50	9.25	7.55	17.12	7.39	6.24
1%	左	2.85	7.65	5.10	9.93	2.88	2.36
	中	2.10	9.00	6.15	15.71	7.16	5.98
	右	2.65	8.85	5.60	15.67	5.14	4.86
2%	左	2.60	6.80	4.75	14.64	1.97	3.17
	中	2.00	8.10	4.90	15.10	3.85	4.56
	右	2.50	7.00	4.75	15.47	1.93	4.93

该优化可满足本次消能防冲的设计标准(50 年一遇),如需进一步提高消能效果,使得校核水位时二级消力池内也能形成稳定的水跃,可设置辅助消能工^[7,10],如增设 T 形墩、消力墩等。

3.2 优化方案消能率计算

优化方案消能元件较多,为定量评价方案的消能效果,选取典型断面(第一、二级消力池出口),对各水位下的消能率进行计算,计算结果如表 4 所示。表中消能率的计算公式为:

$$\eta_i = \frac{H_0 - H_i}{H_0}, H_i = z_i + h_i + \frac{v_i^2}{2g} \quad i = 1, 2^{[9]} \quad (6)$$

式中: H_0 表示水体初始能量; H_1 、 H_2 表示第一、二级消力池出口(桩号 0 + 316.60 m、0 + 475.00 m)能量,单位为 m 。选取断面 0 + 183.60 m 为初始断面,二级消力池出口高程 72.62 m 为势能零点。

表 4 消能率计算表

洪水频率/%	H_0	H_1	H_2	$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$
0.01	40.74	19.24	8.91	53	78
1	37.28	15.16	6.60	59	82
2	36.80	14.60	5.71	60	84