

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.04.032

# 冲击墩、台阶与消能塘联合消能的试验研究

杜凌云, 刘亚坤

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 对泄水建筑物消能工形式的选择是水能资源开发中的重要环节。某水利工程输水洞下游消能塘采用冲击墩、台阶与消能塘联合消能的方式进行消能设计,为研究三种消能工的消能效果,通过模型试验对其消能工的消能率进行对比分析,共进行两种工况的消能方案计算,分别为冲击墩与消能塘联合消能、冲击墩与台阶及消能塘三者联合消能。计算结果表明,三者联合消能方式可以有效消除输水洞水流入塘时的能量从而减轻水流对下游河床及岸边的冲刷,达到保护工程安全的目的。

**关键词:** 消能工;冲击墩;台阶;消能塘;模型试验

中图分类号: TV653

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)04-0162-04

## Research on Comprehensive Energy Dissipation of Bottom-flow with Shock Pier, Stairs and Stilling Basin

DU Ling-yun, LIU Ya-kun

(College of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** It's important to choose an appropriate type of energy dissipation in discharge structures. Here, three kinds of dissipaters, which were shock pier, stairs and stilling basin were designed to dissipate energy in the downstream of the water conveyance tunnel in a hydraulic project. To study the effect of the three energy dissipaters, model test was adopted to research the energy dissipation rate in this paper. Two conditions of energy dissipations were calculated, including the combination of shock pier with stilling basin and the combination of shock pier, stairs and stilling basin. The test results prove that the combination of the three energy dissipaters is effective in eliminating energy of flood flows when they reach the stilling basin of the water conveyance tunnel, thus reducing the scour to the waterbed and river banks in the downstream and protecting the project for it to operate safely.

**Keywords:** energy dissipation; shock pier; stairs; stilling basin; model test

底流消能是利用在消力池内产生水跃进行消能的一种传统的消能方式,具有消能效率高、尾水波动小、泄洪雾化影响小的特点,常常在工程中被采用<sup>[1]</sup>。

在消力池中加设各种消力墩作为辅助消能工,可以增进消力池的消能效果,改善消力池中水跃的稳定性<sup>[2]</sup>。近年来,国内外学者对于在消力池中加设不同形式的消力墩进行了研究,并在实际工程中得到了良好的应用<sup>[3-6]</sup>。高水头溢流坝中常采用台

阶进行消能,在坡面上布置台阶,利用水流的翻滚在台阶面上形成一个个稳定的漩涡,从而使水体表面大量掺气,以达到减速、消能的目的,阶梯消能工的发展历史悠久,正以其显著的优势效力于各种水利工程中<sup>[7-8]</sup>。而在消能塘内或溢流堰末端的逆坡上对于利用台阶消能的研究尚少,某水库输水洞下游的消能塘末端采用了台阶式的布置,本文就其与未布置台阶的消能塘进行对比试验研究,以探索逆坡式台阶对消能塘消能效果的影响。

收稿日期:2014-02-28

修稿日期:2014-03-24

基金项目:国家自然科学基金“黄土沟坡重力侵蚀过程现场试验研究”(51179021)

作者简介:杜凌云(1988—),女,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为工程水力学。

通讯作者:刘亚坤(1968—),女,黑龙江讷河人,博士,教授,博导,主要从事工程水力学教学与科研工作。

# 1 概述

## 1.1 工程概况

某水库位于抚顺市境内,坝址处多年平均径流量  $16.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。输水洞主洞段长度 236.486 m,洞径 6.5 m,末端分为支洞 1 和支洞 2,其中支洞 1 长为 136.694 m,洞径 6.5 m,泄量为  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ (库水位 128.22 m);支洞 2 长度为 150.14 m,分叉前洞径为 5.5 m,后部分叉为支洞 2-1 和支洞 2-2,洞径均为 4.0 m,出口前断面尺寸收缩为  $2.25 \text{ m} \times 2.25 \text{ m}$ ,设计泄量为  $220 \text{ m}^3/\text{s}$ (库水位 128.22 m)。支洞 2 出口为反坡台阶式消能塘,平面尺寸为  $60.5 \text{ m} \times 21.2 \text{ m}$ ,塘内设有分水墩,消能塘前端底板高程为 82.29 m,末端与下游尾渠相连,底板高程为 91.2 m,附近地面高程介于  $98.0 \text{ m} \sim 98.6 \text{ m}$  之间。

## 1.2 模型设计

试验模型按照重力相似准则设计,缩放比例为 1:30 的正态模型<sup>[9]</sup>,模型的平面示意图及剖面布置示意图如图 1 所示。入水口、输水洞及消能塘段采用有机玻璃制作,下游河道段由砂浆制作,流速测量采用南京水科院生产的光电流速仪。



图 2 方案一布置图



图 3 方案二布置图

## 2.1 方案一试验结果

方案一时的试验工况组合如表 1。

表 1 方案一试验工况

库水位 /m	实测流量 /( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	底孔运行方式	水位特征
126.40	429.41	底孔全开	防洪限制水位
131.50	461.88	底孔全开	正常高水位
136.63	493.07	底孔全开	设计洪水位
139.32	508.83	底孔全开	校核洪水位

试验中观察到,各工况下,方案一时塘内水跃均为淹没式水跃。底部水流波动十分剧烈,表面翻滚紊乱。由于从输水洞流出的底部水流以较大流速直冲向消能塘尾部,导致尾部水面大幅壅高,试验中测得消能塘末端与消能塘起始端高差在  $1 \text{ m} \sim 1.5 \text{ m}$  之间,消能塘末端出流流速在  $5.19 \text{ m/s} \sim 5.75 \text{ m/s}$  之间。由此可见消能塘内水面极其不稳定,入塘水流未得到充分的消能。当库水位为校核水位  $139.32 \text{ m}$  时,消能塘起始端左右岸水面高差可达  $1.2 \text{ m}$ ,末端出流流速为  $5.75 \text{ m/s}$ 。校核洪水位时消能塘内水流流态及消能塘末端如图 4。

## 2.2 方案二试验结果

加设台阶后的消能塘作为本次研究的方案二,并采用与方案一相同的试验工况进行研究。方案二校核洪水位时消能塘内水流流态及消能塘末端流态如图 5 所示。

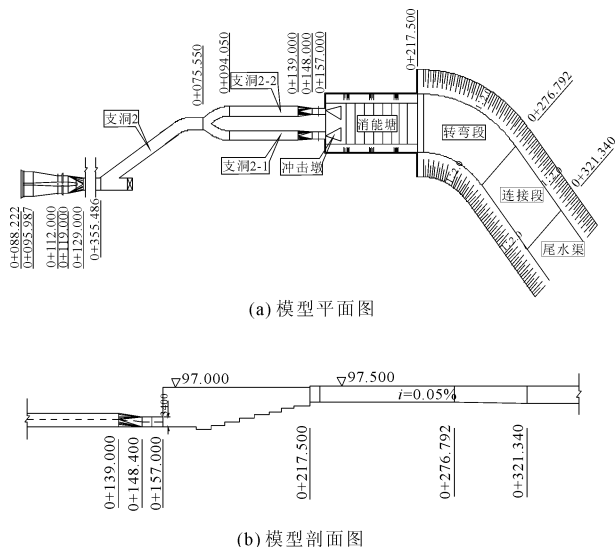
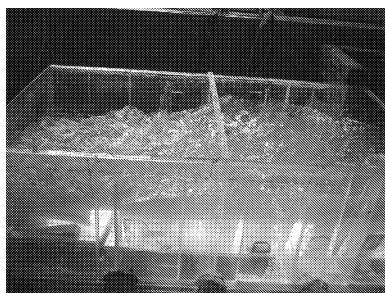


图 1 模型示意图

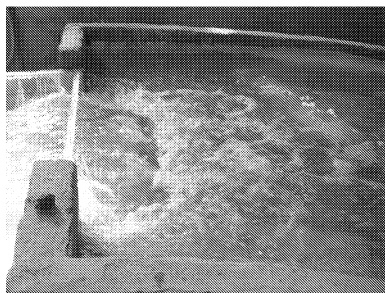
# 2 消能方式研究

为探索在消能塘内布置台阶对消能塘消能效果的影响,采取了两种不同的布置方案,方案一为消能塘与冲击墩联合消能,方案二在消能塘内加设台阶,此时即为冲击墩、台阶与消能塘三者联合消能。

方案一时消能塘内布置如图 2,方案二时消能塘内布置如图 3。

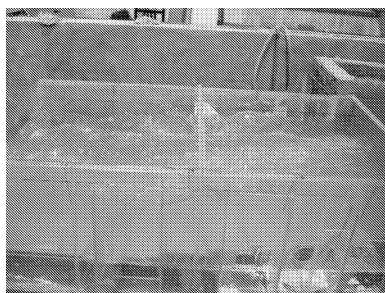


(a) 消能塘内流态

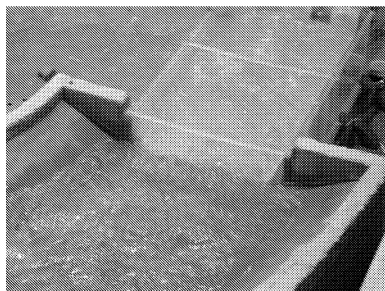


(b) 消能塘末端流态

图 4 方案一校核水位时流态



(a) 消能塘内流态



(b) 消能塘末端流态

图 5 方案二校核水位时流态

试验中观察到,各工况下,消能塘内均形成淹没式水跃,输水洞出口处水流流速在  $18.57 \text{ m/s} \sim 22.01 \text{ m/s}$  之间,由于输水洞出口处水流冲力较大,致使消能塘前方底部水流产生强烈紊动。水流流经塘内冲击墩后,底部水流经反坡式台阶抬升,由于上升的台阶起到了对水流的阻挡和对下垫面加糙的作用,使得消能塘下游水面紊动程度大幅下降,水体得

到较充分消能,出流流速下降至  $3.54 \text{ m/s} \sim 4.06 \text{ m/s}$ ,最终流出消能塘时可与下游河道水流平稳衔接<sup>[10]</sup>。

库水位为  $126.4 \text{ m}$  时,塘内表面水流基本平稳,无较大翻滚水浪,消能塘中部形成较弱逆时针回流,流出消能塘的流速为  $3.54 \text{ m/s}$ 。库水位为设计洪水位  $136.63 \text{ m}$  及校核洪水位  $139.32 \text{ m}$  时,消能塘上游左右两岸波浪对边墙冲击强烈,表面旋滚波动剧烈,消能塘中部逆时针回流流速较大,经台阶碰撞、冲击后,消能塘下游水流减缓,可与下游河道水流平缓衔接,无二次水跃,流出消能塘的流速分别为  $3.99 \text{ m/s}$ 、 $4.06 \text{ m/s}$ 。

### 2.3 方案一与方案二消能率比较

设输水洞与消能塘连接处为第一断面,消能塘与下游河道连接处为第二断面。就这两断面对本文两种方案的消能率  $\eta$  进行对比计算<sup>[11-15]</sup>,采用计算公式为式(1)~式(3):

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (1)$$

$$E_1 = 2(h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1) \quad (2)$$

$$E_2 = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (3)$$

式中: $E_1$ 为第一断面处单位重量水体具有的总能量; $E_2$ 为第二断面处单位重量水体具有的总能量; $z_i$ 为*i*断面处以输水洞出口末端为基准面的底面高程,已知  $z_1 = 0$ ,  $z_2 = 8.91 \text{ m}$ ,  $h_i$ 为断面中心点处水深。计算结果如表 2 所示。

由上述计算结果可知,各工况下方案二的消能率均高于方案一的消能率,消能率是衡量消能工的一项重要指标,消能率的提高不仅可以增加工程的安全性,更可有效维护消能塘自身和下游河道岸坡的稳定;同时方案二还可以减少开挖量,从而进一步降低工程成本。

## 3 结 论

通过对某工程输水洞末端消能工的布设形式进行水工模型试验研究,结果显示冲击墩、台阶与消能塘联合消能形式的消能率较高且能更有效平稳水流,减少开挖量。因此,当受下游河道地形、河床地质条件等限制因素需采用底流消能时,所需消能塘往往开挖量较大,可因势利导,在塘内修建逆坡式台阶并使之与消能塘出口末端衔接,不仅可以大幅度减少开挖量降低工程投资,还可有效提高消能塘的

表 2 两方案消能率计算结果

库水位 /m	方案	1-1 断面				2-2 断面			消能率 /%
		$h_1$	$p_1$	$v_1$	$E_1$	$h_2$	$v_2$	$E_2$	
126.40	方案一	1.70	11.53	18.66	41.27	4.86	5.19	12.71	69
	方案二	1.70	11.96	18.57	41.04	2.16	3.54	11.71	71
131.50	方案一	1.70	11.95	20.06	46.88	5.65	5.46	13.26	72
	方案二	1.70	12.08	19.98	46.59	2.17	3.78	11.81	75
136.63	方案一	1.70	12.03	21.36	52.41	5.89	5.66	13.49	74
	方案二	1.70	12.19	21.33	52.30	2.19	3.99	11.91	77
139.32	方案一	1.70	12.27	22.10	55.76	6.09	5.75	13.64	76
	方案二	1.70	12.26	22.01	55.33	2.24	4.06	11.99	78

消能率,减免下游河道受高速水流的冲刷,使塘内水流更加平稳,从而保证消能塘自身稳定。反坡式台阶的消能作用与台阶相对尺寸及水流流速均有关,工程中应依据具体情况选择合适尺寸进行开挖。由此可见,采用台阶、冲击墩及消能塘联合消能的方案可有效保护下游河床,避免护坦受到严重冲刷,最大限度发挥其经济效益。

参考文献:

[1] 孙永娟,孙双科.高水头大单宽流量底流消能技术研究成果综述[J].水力发电,2005,31(8):70-72.  
 [2] D.B.F.哈尔曼,王湧泉.消力池中消力墩的作用[J].水力发电,1957,(21):35-39.  
 [3] 花立峰.消力墩-T型墩-消能塘联合消能的试验研究[J].水利水电工程设计,2004,23(1):40-43.  
 [4] 吴宇峰.消力墩对水跃跃长的影响[J].四川水力发电,2004,23(3):52-53.  
 [5] 张晓莉,焦娟.宽尾墩与消力墩在班多水电站的应用[J].西北水电,2008,(4):24-26.  
 [6] 刘美茶,刘韩生.卡尔达拉水电站消力池与消力墩形体

试验研究[J].人民长江,2010,41(7):86-88.  
 [7] 潘瑞文,徐一民.阶梯溢流坝的水流特性与消能效果[J].云南工业大学学报,1995,11(4):1-7.  
 [8] 聂境,张建民,栗帅.阶梯消能工水力特性研究综述[C]//第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议论文集.四川:四川大学,2013.  
 [9] 刘亚坤.水力学[M].北京:中国水利水电出版社,2008.  
 [10] 倪汉根,刘亚坤.击波水跃跌水消能[M].大连:大连理工大学出版社,2008.  
 [11] 陈群,戴光清,朱分清,等.影响阶梯溢流坝消能率的因素[J].水力发电学报,2003,(4):95-104.  
 [12] 汤升才,金峰,石教豪.台阶式溢流坝试验研究与消能率计算[J].人民长江,2008,39(12):43-45.  
 [13] 彭勇,张建民,许唯临,等.前置掺气坎式阶梯溢洪道掺气水深及消能率的计算[J].水科学进展,2009,20(1):63-67.  
 [14] 汤慧,刘亚坤,倪汉根.消能工在白杨河水库的联合应用[J].水利与建筑工程学报,2011,9(6):78-80.  
 [15] 田嘉宁.台阶式泄水建筑物水力特性试验研究[D].西安:西安理工大学,2005.

(上接第 119 页)

7 结 语

柳树沟水电站的泄水建筑物采用分层布置,以导流兼泄洪洞为主,溢洪洞为辅的布置格局。经水工模型试验验证和详细设计研究,并经导流期过水验证和初期下闸蓄水的考验;目前,柳树沟水电站已投产发电一年多,运行正常,经济效益良好,监测资料也表明水工建筑物运行情况良好。

柳树沟水电站的泄水建筑物设计,总体达到了优化枢纽布置、加快建设速度和减少投资的预期目标。通过本文对柳树沟水电站的泄水建筑物设计总结,对类似工程的设计有一定借鉴作用。

参考文献:

[1] 苗喆,王卫国,张新民,等.柳树沟水电站工程可行性研究报告 6:工程布置及建筑物[R].西安:西北勘测设计研究院,2007:78-110.  
 [2] 卞全,苗喆,冷云,等.新疆柳树沟水电站工程竣工安全鉴定设计自检报告[R].西安:西北勘测设计研究院,2013:118-200.  
 [3] 诸亮,卫勇,徐春燕,等.新疆开都河柳树沟水电站工程整体水工模型试验研究报告[R].西安:西北勘测设计研究院,2007:15-37.  
 [4] 诸亮,徐春燕.柳树沟水电站泄洪消能试验研究[J].西北水电,2009,(3):23-26.