

# 闸后两种消能型式的试验对比研究

杨玲, 孙娟, 戚印鑫

(新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

**摘要:** 新疆渠首大部分修建在出山口位置, 夏季河道洪水峰高量大, 携带泥沙多、持续时间长, 洪水对泄洪闸下游河床淘刷严重, 威胁闸室稳定。工程建设中主要采用斜护坦 + 深隔墙和斜护坦 + 裙板两种型式进行消能防冲处理。为了分析这两种型式的消能效果, 选择塔尔朗渠首工程, 通过水工模型试验进行了对比研究。试验反映出, 两种消能工都具有较好的消能效果。裙板的倒坡构造还能够使洪水产生部分回流, 将河床质泥沙带回齿墙部位, 从而减小了齿墙部位的淘刷。为此, 试验中重点开展3种结构尺寸的裙板消能试验。试验结果表明: 长度为6m的裙板消能型式与深齿墙消能型式的冲刷深度接近, 冲坑深度最浅; 但裙板消能冲坑最深处距离齿墙的位置却大于深齿墙消能型式。因此, 裙板消能型式在满足消能效果的同时, 能够较好地保护斜护坦齿墙不被淘刷, 从而提高齿墙的安全性能。

**关键词:** 低水头引水枢纽; 模型试验; 消能防冲; 斜护坦消能; 裙板消能

中图分类号: TV653

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)06-0157-06

## Comparative study on two types of energy dissipation after brake

YANG Ling, SUN Juan, QI Yinxi

(Xinjiang Research Institute of Water Resources And Hydroelectric Science, Urumqi 830049, China)

**Abstract:** Most of the canals in Xinjiang are built in the location of the mountain pass. The flood peak of the river is large in summer, carrying a lot of sediment and showing a short duration, and the scouring of the riverbed after the sluice gate is serious, threatening the stability of the gate chamber. In the engineering construction, the energy-saving and anti-shock treatment is mainly carried out in two types: sloped apron + deep partition wall and sloped apron + apron board. In order to analyze the effect of these two types of energy dissipation, a comparative study was carried out through the hydraulic model test by choosing the Tarlang Canal Head Project. The experiment shows that the both kinds of energy dissipation work have good effect. The slope structure of the apron board can also cause the flood to produce partial reflux, which will bring the bed sediment back to the wall part, thereby reducing the scouring on the tooth wall. To this end, the experiment focuses on three kinds of structural sizes of skirt board elimination test. The test results show that the apron board energy dissipation type with the length of 6m is close to the erosion depth of the deep tooth wall energy dissipation type, and the depth is the shallowest. However, the position of the apron board crater is greater than that of the deep tooth wall. As a result, the apron board energy dissipation type can improve the safety performance of the tooth wall, while protecting the slope apron wall from being washed.

**Key words:** low-head control division project; model test; energy dissipation and erosion; sloped apron energy dissipation; apron board energy dissipation

## 1 研究背景

目前在新疆地区的引水枢纽工程中, 闸后消能防

冲型式大多数采用斜护坦 + 深隔墙的型式或裙板消能型式<sup>[1-4]</sup>。20世纪60-80年代, 受水下施工技术的制约, 深隔墙的埋设深度不能满足冲刷坑深度的要

收稿日期: 2017-12-23; 修回日期: 2018-04-23

基金项目: 新疆维吾尔自治区科研院所基本科研经费项目(KY2017120)

作者简介: 杨玲(1974-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 本科, 高级工程师, 主要从事水利工程规划设计和水工模型试验研究。

通讯作者: 戚印鑫(1975-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事水利工程规划设计和水工模型试验研究。

求,就采用长护坦,将冲刷坑外移,远离闸室,长护坦的使用,对保持下泄水流平顺,减轻下游泥沙淤积都有良好的作用,90年代受泥沙磨损问题的困扰,加之水下建筑物施工工艺的提高和完善,越来越多的工程倾向于选择使用短护坦,甚至无护坦的形式。

防冲裙板是将防冲板与防冲墙的结合的消能方式,它将入射水流分散,扩大入水面积,减少了河床单位面积上的冲击荷载,从而减轻了水流对河床的冲刷,同时利用产生的负漩滚将河床质回淤至防冲墙处,从而可防止基础被淘刷。1958年在新疆尝试运用,此后,科技人员一直在不断进行探索研究。陈树林等通过室内模型试验对防冲裙板消能形式进行了理论分析,确定了设计原则和方法。工程实践证明,防冲裙板是多沙河流软基上一种行之有效的消能防冲形式,在新疆大中型引水枢纽中<sup>[5]</sup>,近1/3工程采用了该形式。随着施工工艺的革新,防冲裙板的设计理念 and 材料使用都发生了变化。设计理念上不再重视利用“负漩滚”回淤河床质以保护防冲墙的功能,而是采用尽可能下深防冲墙及防冲墙下游抛填大卵石、铅丝笼等措施来解决基础淘刷问题,裙板仅保留分散水流,使冲刷坑外移的作用,结构设计大为简化。

但实际工程运行后这两种消能型式消能效果哪一种更好,差异如何,各自的优劣势等问题目前研究很少。基于此,本文通过塔尔朗渠首模型试验<sup>[6]</sup>,针对以上两种消能型式的消能效果进行了对比研究,可以为今后此类工程设计提供参考依据。

## 2 渠首工程概况

### 2.1 工程概况

塔尔朗渠首采用全拦河闸方案,利用地形条件,将引水闸布置在河道左岸。引水闸1孔净宽3m,泄洪冲砂闸3孔单孔净宽7m。护坦长160m,宽度为23.4m,与泄洪冲砂闸闸室同宽,护坦坡度为3.2%。平面布置图见图1。

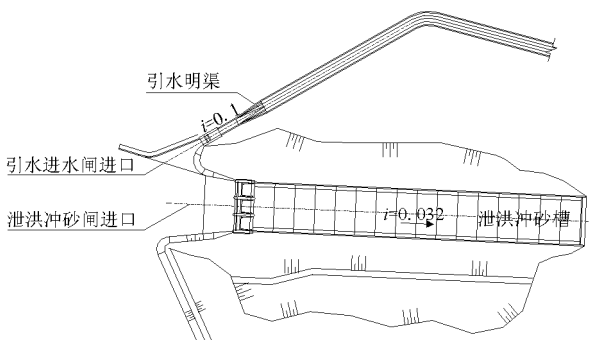


图1 塔尔朗引水渠首工程平面布置图

### 2.2 水文(洪水)特征

本次试验主要研究渠首在通过大流量时的下游河床淘刷深度及位置,包括 $P = 10\%$ 流量为 $192 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $P = 5\%$ 流量为 $282 \text{ m}^3/\text{s}$ (设计流量)、 $P = 2\%$ 流量为 $410.0 \text{ m}^3/\text{s}$ (校核流量)<sup>[7]</sup>。以上运行状态下引水闸关闭。水文特征参数见表1。

表1 水文(洪水)特征参数

项目	设计频率/%			
	2	5	50	80
洪峰流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	410	282	42.7	29.9
闸前水位/m	1160.75	1159.69		

## 3 消能型式基础尺寸设计

### 3.1 斜护坦长度的确定

斜护坦+深隔墙的结构形式是根据“海漫+防冲槽”的结构特征及消能防冲原理演化而来<sup>[1]</sup>,因此斜护坦长度的确定参照海漫长度的计算公式。海漫的长度主要是由消能后的水能大小以及河床土质的抗冲能力决定的<sup>[8]</sup>。目前海漫长度 $L_p$ 计算公式有以下两种:

(1) 估算方法<sup>[9]</sup>:

$$L_p = (8.5 \sim 12.5) h_t \quad (1)$$

式中: $h_t$ 为下游水深,m。

(2) 由南京水利科学研究院提出的经验公式<sup>[10]</sup>:

$$L_p = K_s (q_s (\Delta H)^{1/2})^{1/2} \quad (2)$$

式中: $q_s$ 为消力池末端单宽流量, $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;  $\Delta H$ 为闸孔泄水时的上、下游水位差,m;  $K_s$ 为海漫长度计算系数。若河床土质为细砂及砂壤土时, $K_s = 10 \sim 12$ ;若河床土质为粗砂及黏性土壤时, $K_s = 8 \sim 9$ ;若河床土质为硬黏土时, $K_s = 6 \sim 7$ 。

两种公式计算成果详见表2。

表2 护坦长度计算表

$Q/$ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	经验公式			估算方法		
	$K_s$	$\Delta H/\text{m}$	$L_p/\text{m}$	系数	$h_t/\text{m}$	$L_p/\text{m}$
282	12	8.90	71.95	12.5	2.80	35.00
410	12	8.35	85.39	12.5	3.35	41.88

两种公式得出的数值相差较大,公式(1)得出护坦长度最大值为41.88m;公式(2)得出护坦长度最大值为85.39m。结合塔尔朗渠首地形条件,考虑到与上下游河道平顺连接,斜护坦长度取160m。

### 3.2 冲刷深度的确定<sup>[11-12]</sup>

冲刷深度的设计,根据不同的消能防冲形式,采用不同的经验公式计算。

3.2.1 海漫末端河床冲刷深度 河床冲刷深度计算公式<sup>[10]</sup>:

$$d_m = 1.1q_m/V_0 - h_m \quad (3)$$

式中: $d_m$  为闸后海漫末端河床冲刷深度,m; $q_m$  为闸后海漫末端单宽流量, $m^3/(m \cdot s)$ ;  $V_0$  为河床土质允许不冲流速, $m/s$ ;  $h_m$  为闸后海漫末端河床水深,m。

设计、校核流量河床冲刷深度计算成果见表 3。

表 3 冲刷深度计算表

$Q/$ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	$B/$ m	$q_m/$ ( $m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )	$v_0/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$h_m/$ m	$d_{50}/$ m	$d_m/$ m
282	23.4	12.05	1.5	2.80	0.03	6.04
410	23.4	17.52	1.8	3.35	0.03	7.36

3.2.2 裙板下游冲刷深度 新疆水科院通过模型试验,对裙板消能的水力特性和冲刷规律进行了分析和研究,提出不同衔接流态下下游冲刷坑深度的经验公式<sup>[13]</sup>:

(1)底流衔接冲刷深度:

$$T/E_0 = 0.445K^{0.336}(d_{50}/E_0)^{-0.156} \quad (4)$$

(2)面流衔接冲刷深度:

$$T/E_0 = 0.682 - 0.314(K - 0.15)^{0.2} - 2.998(d_{50}/E_0) \quad (5)$$

式中: $E_0$  为闸前总水头,对本工程,取上游水位与闸后护坦末端高程之差,m; $d_{50}$  为下游河床质的中值粒径,m,对本工程取  $d_{50} = 0.03$  m;  $T$  为从护坦末端高程算起的最大冲深,m;  $K$  为流能比, $K = q/(g^{0.5} \cdot E^{1.5})$ ;  $q$  为单宽流量, $m^3/(m \cdot s)$ ;  $g = 9.81$   $m/s^2$ 。

流态判别式为  $K' = 0.644(h_t/E_0) - 0.074$ ,当  $K > K'$ ,为面流衔接;当  $K < K'$ ,为底流衔接,其中  $h_t$  为下游水深。通过对设计、校核流量的流态判别,均为面流衔接。

冲刷深度计算成果见表 4。

表 4 裙板下游局部冲刷深度计算表

$Q$ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	$d_{50}/$ m	$E_0/$ m	$h_t/$ m	$K$	$K'$	$T/$ m
282	0.03	9.52	2.80	0.13	0.12	7.76
410	0.03	10.82	3.35	0.16	0.13	6.02

通过公式(3)、(5)两种计算结果得出最大冲刷

深度  $T = 7.76$  m。为了便于试验研究,模型设计中冲刷深度取 11 m。

### 3.3 裙板长度的确定

裙板长度采用挑流消能中水舌挑射距离公式来估算<sup>[9]</sup>:

$$L = 2\varphi^2 \cos\theta \left[ \sin\theta + \left( \sin^2\theta + \frac{1}{\varphi^2} \cdot \frac{z + t - s_1}{s_1} \right)^{1/2} \right] s_1 \quad (6)$$

式中: $\varphi = (1 - 0.055/K^{0.5})^{1/3}$ ;  $K = q/(g^{0.5} E^{1.5})$ ;  $s_1 =$  上游水位高程 - 鼻坎高程,m;  $z =$  上游水位高程 - 下游水位高程,m;  $t =$  下游水位高程 - 下游河床高程,m;  $E =$  上游水位高程 - 下游河床高程,m。

其中裙板角度参考新疆已建工程经验,确定裙板坡度为 1:10,即角度  $\theta$  为  $5.71^\circ$ 。

当  $Q_{\text{设}} = 282$   $m^3/s$  时, $L = 7.46$  m;当  $Q_{\text{校}} = 410$   $m^3/s$  时, $L = 8.19$  m。

由此可以看出裙板长度  $L$  应小于 8 m,新疆已建工程裙板长度一般在 3~6 m,此次选取  $L = 4、5、6$  m 分别进行分析研究。

### 3.4 裙板结构的确定

综合以上计算成果,参照已建工程<sup>[5]</sup>确定裙板坡度为 1:10,采用长短齿交替布置方式,长齿长度分别取 4、5、6 m,短齿长度取长齿的 2/3,齿间距为 6 cm,裙板起始高程低于护坦末端高程 30 cm,裙板与护坦末端之间的间隙为 30 cm,设计隔墙深为 11 m。裙板结构详见图 2。

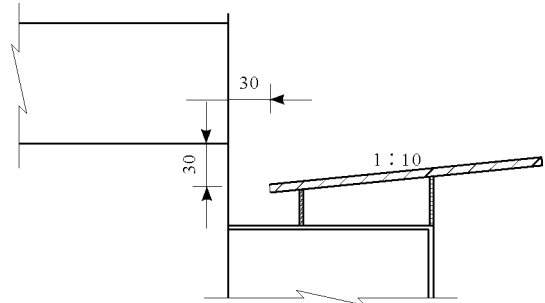


图 2 裙板结构图

## 4 模型设计与制作

按照重力相似准则,由最小水深控制模型比尺,确定模型比尺为 1:30<sup>[14-17]</sup>。

为了真实地反映河道的输砂、淤积形态及泄洪冲砂闸的排砂效果,河道采用定床和动床两部分模拟。岸坡采用定床,用水泥砂浆制作;上、下游河道地形采用动床形式,用模型沙模拟,定床与动床均按照 1:1000 地形图精确模拟。

裙板采用直径 6 mm 的钢筋进行制作。

由于原型泥沙为推移质,颗粒很粗,根据模型试验的理论和方法,模型沙可以采用比重与原型沙比重相同而仅粒径缩小的天然沙。原型及模型沙颗粒级配曲线见图 3。

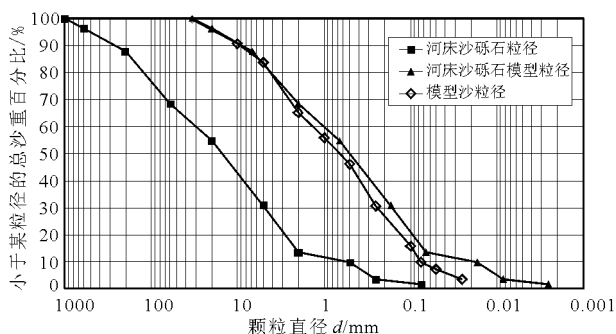


图 3 原型及模型沙颗粒级配曲线

## 5 结果与分析

### 5.1 试验工况及时时

按照选取的 3 种频率下的流量,在 3 孔泄洪闸全开,引水闸关闭的情况下,洪水历时根据洪水过程线选取 1 h 进行冲刷试验。

### 5.2 斜护坦 + 深齿墙方案试验成果

5.2.1 各工况闸后流速分布情况 试验测试的泄洪闸闸后不同断面、不同位置的流速分布情况见表 5。由表 5 可知:

(1)设计和校核流量下,护坦内流速表现为中间流速大于边缘流速;由于主流靠右岸,左岸边缘流速小于右岸边缘流速,护坦内整体水流有折冲现象,水面波动。

(2)192 m<sup>3</sup>/s 流量时,闸后流速从左至右逐渐增大。护坦内整体折冲水流明显,水面出现折线波。

5.2.2 各工况护坦末端冲刷情况 不同工况的试验结果表明:校核流量情况下,护坦末端冲刷坑深度最大。最大冲刷坑深度为 8.01 m,最大冲刷距护坦末端的水平距离为 25 m。护坦下游冲刷情况见表 6,冲刷地形见图 4~6。

表 5 各工况泄洪闸后流速表 m/s

断面/ m	位置	洪水频率 $P/\%$ 及流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$		
		$P = 2$	$P = 5$	$P = 10$
		$Q_{校} = 410$	$Q_{设} = 282$	$Q_{10\%} = 192$
0 + 000	左	6.10	5.72	5.73
	中	7.03	6.68	6.42
	右	6.76	6.09	5.42
0 + 040	左	8.05	7.47	7.12
	中	9.15	8.07	7.56
	右	9.19	8.86	8.17
0 + 080	左	8.76	8.52	8.18
	中	10.10	9.26	7.63
	右	9.66	7.88	8.22
0 + 120	左	9.61	9.36	7.84
	中	10.43	10.22	9.15
	右	10.62	10.60	9.55
0 + 160	左	10.52	9.73	8.99
	中	11.44	10.96	9.68
	右	11.10	10.48	9.64

### 5.3 裙板消能方案试验成果

试验针对 4、5、6 m 3 种裙板长度、3 种不同的流量进行正交试验。试验组数共计 9 组。

5.3.1 各工况闸后流速分布情况 护坦上的流速与斜护坦 + 深齿墙试验成果一致。主要研究护坦下游流速分布情况,通过试验发现,通过裙板消能,入池流速明显降低。不同频率下,入池流态变化明显。详见表 7。

5.3.2 各工况裙板末端冲刷情况 不同工况的试验结果表明:校核流量情况下,裙板末端冲刷坑深度最大。其中 4m 裙板最大冲刷坑深度为 8.83m,距离护坦末端的最远水平距离为 26 m;5m 裙板最大冲刷坑深度为 8.60 m,距离护坦末端的最远水平距离为 27 m;6 m 裙板最大冲刷坑深度为 8.26 m,距离护坦末端的最远水平距离为 30 m。护坦下游冲刷情况见表 8,校核流量冲刷地形见图 7~9。

表 6 斜护坦 + 深齿墙方案各试验工况护坦下游冲刷情况表

洪水频率 $P/\%$	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	泄洪闸	引水闸	洪水历时/h	0 + 160m 断面护坦末端高程/m	最深坑底高程/m	最大冲坑深度/m	最大冲深至护坦末端的水平距离/m
2	410	开启	关闭	1	1150.88	1142.87	8.01	25
5	282	开启	关闭	1	1150.88	1144.97	5.91	21
10	192	开启	关闭	1	1150.88	1147.08	3.80	11



