

低坝宽尾墩水力特性研究

罗国杰

边愷元 吴桢祥

(黄委会设计院)

(郑州工业大学水环系)

摘 要 宽尾墩是一种新型消能工。本文研究表明,低坝上宽尾墩与高坝上宽尾墩一样,也具有消能充分、显著降低跃后水深及减少水跃长度的水力特性,同时也具有自身的水流特点。

关键词 低坝 宽尾墩 消能

中图分类号 TV641

1 引言

宽尾墩是一种新型消能工,它是收缩式消能工的一种。宽尾墩是 1974 年由北京水科院工程师龚振瀛在安康水电站(坝高 93m,设计水头 19.8m)的水工模型试验中首次提出的。当时是宽尾墩一屏式消力池方案,研究表明,宽尾墩促进消能效果作用极其显著。

本文采用试验方法,着重研究低坝上宽尾墩水力特性。

2 低坝上宽尾墩水力模型试验装置及试验组次

2.1 试验装置

本文研究的低坝,是指坝高 $P=20\text{m}$ 左右,水头 $H_d=10\text{m}$ 左右的实用堰,这时按常规设计要求(加弧形门、工作桥),墩尾一般接近下游,而不是指通常意义下的低堰 $P/H_d \leq 1.33$ 。

试验在宽 $B_0 = 40\text{cm}$, 高 75cm , 长 13m 的平底玻璃槽中进行, 流量由三角堰控制, 下游水位由一尾门控制。溢流坝面采用标准的 WES 断面, 设计坝高 $p = 20\text{cm}$, 设计水头 $H_d = 10\text{cm}$, 与下游衔接的反弧半径为

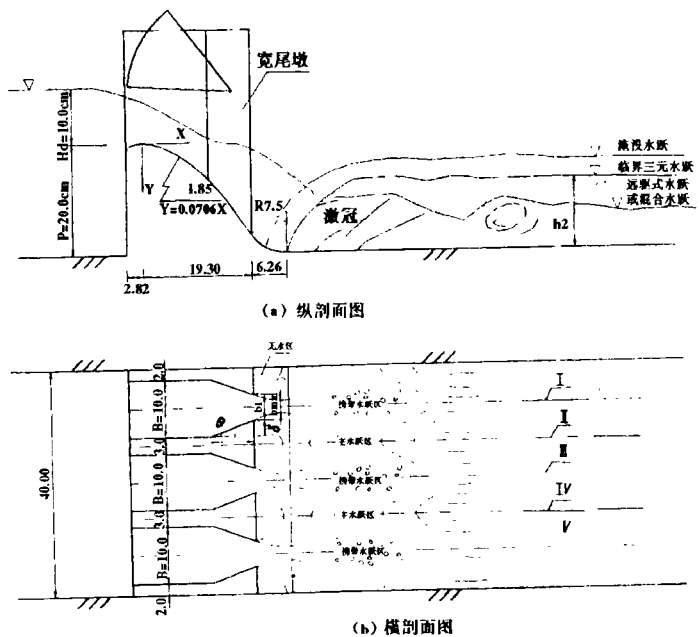


图 1 试验装置布置简图

$R=7.5\text{cm}$ ，在试验时考察实际动行要求，闸墩长和宽尾墩位置是按有弧形闸门布置的，见图 1。

根据收缩率的不同，共做了三种宽尾墩体型，分别称为 KWT— I ($\beta=0.3$)、KWT— II ($\beta=0.44$)与 KWT— III ($\beta=0.64$)。几何参数见表 1。

2.2 试验组次

表 1 宽尾墩几何参数

首先在直尾墩上游水头 $H=6$ 、8、10、13cm 四种情况进行试验，这时测的流量分别为 $Q=8.81, 14.00, 20.47, 32.47\text{l/s}$ ，然后在以上流量对 3 种宽尾墩体型进行试验，共 $4\times 4=16$ 个试验组次。

体型 参数	TWT— I	KWT— II	KWT— III
β	0.3	0.44	0.64
b_1	3cm	4.4cm	6.4cm
θ	20°	22.17°	23.6°
l	9.62cm	6.87cm	4.12cm
δ	3.5cm	2.8cm	1.8cm

3 低坝上宽尾墩的水力特性

3.1 宽尾墩对下泄流量的影响

通常人们担心，泄流能力会受到宽尾墩的影响，因而使用宽尾墩的第一个要求即，不应明显影响下泄流量。

本试验使宽尾墩流量保持与直尾墩一致，测得堰上水头 H ，由堰流公式 $Q=mb\sqrt{2g}H^{3/2}$ 可知 $\frac{\Delta Q}{Q}=\frac{3}{2}\frac{\Delta H}{H}$ ，从而计算出宽尾墩对下泄流量的影响，见表 2。

表 2 宽尾墩对下泄流量影响

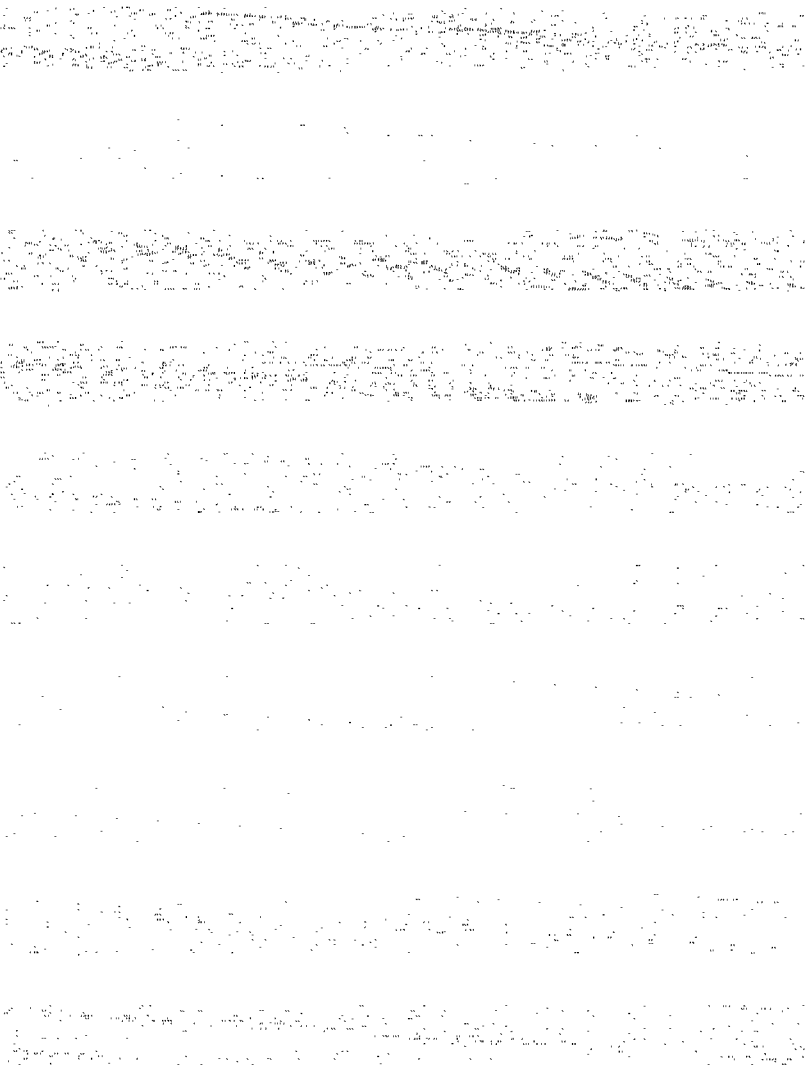
β H 及 $\frac{\Delta Q}{Q}$ $Q(\text{l/s})$	直尾墩 $\beta=1.0$	KWT— I $\beta=0.3$		KWT— II $\beta=0.44$		KWT— III $\beta=0.64$	
	$H(\text{cm})$	$H(\text{cm})$	$\frac{\Delta Q}{Q}$	$H(\text{cm})$	$\frac{\Delta Q}{Q}$	$H(\text{cm})$	$\frac{\Delta Q}{Q}$
8.80	6.00	6.00	0.0%	6.00	0.0%	6.00	0.0%
14.00	8.0	8.05	0.94%	8.05	0.94%	8.05	0.94%
20.47	10.0	10.15	2.25%	10.05	0.75%	10.05	0.75%
32.47	13.0	13.65	7.5%	13.28	3.23%	13.19	2.19%

从表 2 可只，当在设计水头 $H=10\text{cm}$ 以下时，除 KWT— I 外， $\frac{\Delta Q}{Q}$ 均小于 1%，即对下泄流量没有明显影响。

3.2 宽尾墩的水跃特性研究

3.2.1 水跃型态

由于宽尾墩加宽了墩尾，水流在闸室内也随墩尾逐渐加宽而逐渐壅高。在本试验范围内，闸墩出口处铅垂线水深增加到直尾墩水深的 1.5~2.27 倍。每一闸孔出流都在坝面尾端沿闸孔中心线形成一道窄而高的水舌，而墩后形成无水区。水舌在大的侧压梯度作用下(因水舌两侧突然遇大气)，急速向两侧扩散，并在惯性力作用下向前动运。相邻两侧扩散水流在反弧段末端附近相遇后猛烈对撞，当下游水位较低时，在闸墩中心线上，水位壅高组成新的



(1)水跃长度

这里的水跃长度是指临界三元水跃长度。

三元水跃比平面水跃更为复杂,本试验通过三条线 I—I、II—II、III—III 测量了三元水跃底部时均流速,发现三条线上的底部流速 U_o 都经历了突然下降而又缓慢增加的过程,存在有最小值 U_{bmin} 。而在主水跃区的 II 线上发生最小值 U_{bmin} 断面距反弧段末端断面要比携带水跃区 I、III 线更长一些。

3.2.2 水跃长度及跃后水深

图 2 是流量 $Q=20.47l/s$ 时,KWT—I ($\beta=0.3$) 的 $\frac{U_{bI}}{U_o}$ 、 $\frac{U_{bII}}{U_o}$ 、 $\frac{U_{bIII}}{U_o}$ 的沿程度变化图。

本文定义,主水跃区底部流速最小值 U_{bIImin} 断面作为跃尾断面,水跃长度 L_j 即 Le_{II} 。

本试验得到的水跃长度见表 3。

可以看到:宽尾墩水跃长度与直尾墩相比,有较大幅度减少。减幅在 20~42.1% 之间,在本试验范围内,宽尾墩折角 $\theta=20\sim23.6^\circ$ 变化不大,收缩率 $\beta\rightarrow$ 小时,水跃长度略微减少,但不太显著。

表 3 试验水跃长度 L_j

Q (l/s)	E_o/h_k	h_k (cm)	Lj(cm)			
			直尾墩	DWT—I	DWT—II	DWT—III
8.80	7.03	3.7	65	40	42	45
14.00	5.55	5.04	70	45	50	56
20.47	4.62	6.50	95	55	60	65
32.47	3.73	8.83	110	67	71	78

注: E_o ——上游能量水头 $E_o=H+P+\frac{V_o^2}{2g}$

这就给我们一个有益启示,宽尾墩可以大量减少水跃长度从而减少消力池长度,但当不要求下游水深降低太多时,没有必要将 β 值定得过小。因为 β 值过小,水跃长度不再明显减少,反而会带来影响泄流、堰上水面壅高过大等问题。

综合文献(2),与本文试验,经二元回归可得以下公式。

$$L_j/h_k = 1.738 + 3.782\beta + 1.152E_o/h_k$$

其相关系数 $R=0.962$,可见线性拟合效果良好。采用本公式计算值与本试验值最大误差为 5.41%,文献(2)最大误差 8.95%。

(2)跃后水深 h_2

宽尾墩的跃后水深 h_2 普遍小于直尾墩相应流量的跃后水深,且随着流量 Q 愈大, β 愈小, h_2 减少程度愈大。

关于跃后水深见表 4。

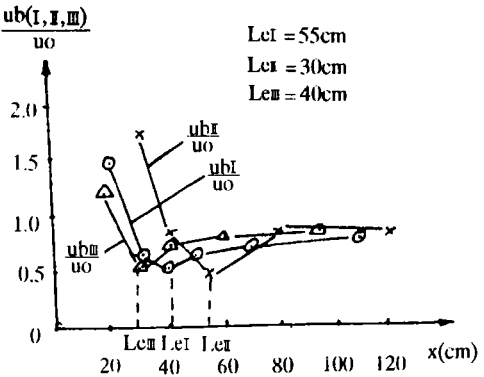


图 2 底部流速沿程变化

注: U_{bI} 、 U_{bII} 、 U_{bIII} ——I—I II—II III—III 线上的底部流速; U_o ——断面平均流速;
 Le_{I} 、 Le_{II} 、 Le_{III} 相应 I—I II—II III—III 线上底部流速最小值断面至反弧段末端距离。

表 4 本试验临界水跃跃后水深 h_2 (cm)

Q (l/s) 项目 β	$Q=8.80$		$Q=14.00$		$Q=20.47$		$Q=32.47$	
	h_2	$\frac{\Delta h_2}{h_2 \text{ 直}}$	h_2	$\frac{\Delta h_2}{h_2 \text{ 直}}$	h_2	$\frac{\Delta h_2}{h_2 \text{ 直}}$	h_2	$\frac{\Delta h_2}{h_2 \text{ 直}}$
KWT-I $\beta=0.3$	7.6	-10%	9.4	-16.1%	11.2	-15.8%	13.6	-19.1%
KWT-II $\beta=0.44$	7.7	-9.89%	9.7	-13.4%	11.6	-12.8%	14.2	-15.5%
KWT-III $\beta=0.64$	8.42	-0.59%	10.2	-8.9%	12.4	-6.8%	15.25	-9.3%
直尾墩	8.45		11.2		13.3		16.8	

注： $\Delta h_2 = h_2 - h_2 \text{ 直}$ ， $h_2 \text{ 直}$ 为直尾墩情况时的临界水跃跃后水深。

3.2.3 跃后段水力特性

平面水跃的跃尾断面水面已趋于平稳，底部不再产生气泡，仅在水面处有少量气泡。水流看似与下游正常恒定均匀流并无区别，但实际上此时底部流速仍远远大于顶部流速。只是在如图 3 所示的 3-3 断面时均流速分布和紊动值才接近于均匀流情况。

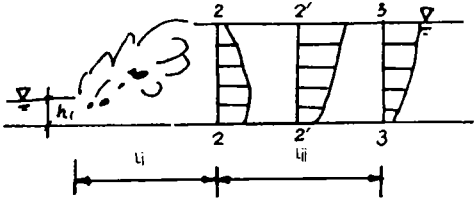


图 3 平面水跃跃后段示意图

图 3 中的 L_{ji} 即水跃的跃后长度，确定跃后段长度的意义在于用之确定海漫长度。
图 4(a) 为宽尾墩跃尾断面及均匀流断面流速分布，为 KWT-III， $\beta=0.44$ ， $Q=20.47$ l/s。图 4(b) 为相应流量下直尾墩情况。

可见宽尾墩与直尾墩情况不同的是：

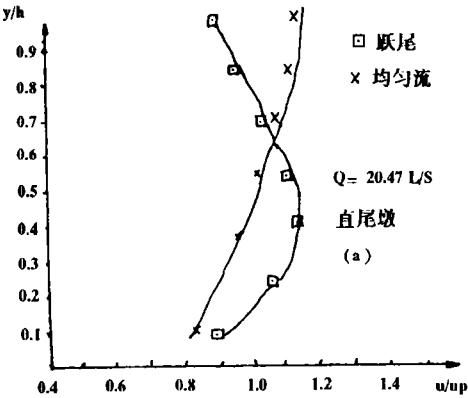


图 4 (a) 跃尾断面及均匀流断面流速分布

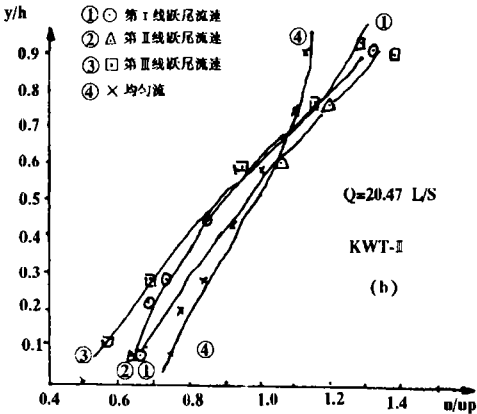


图 4 (b) 跃尾断面及均匀流断面流速分布

①宽尾墩在跃尾断面表面流速大，底部流速小，而直尾墩为跃尾断面底部流速大，表面流速小。②从跃尾断面到近似均匀流断面，宽尾墩情况表面流速沿程减少，底部流速沿程增大；而直尾墩则表面流速沿程增大，底部流速沿程减少。

由上可知,虽然宽尾墩水跃跃尾断面流速分布也不均匀,但因其底部流速比均匀流时还小,时均流速分布的调整不是跃后段长度的控制因素。因而还应对流速进行紊动测量。

试验证明,底部流速紊动强度与断面平均紊强基本上是一致的,沿程单调下降趋势,然后在一个常值稍有摆动不再下降。但是考虑到底部紊动对河床冲刷的直接影响,取 τ_{ub} 刚好不再下降断面作为紊动调整正常断面 X_3 。

τ_{ub} 为底部流速紊动强度。 $T_{ui} = \frac{\sqrt{D_i}}{U_i}$ (D_i ——均方差 $D_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U}_i)^2$,
 \bar{U}_i ——时均流速, $\bar{U}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i$,那么定义底部 $Y = 1.0\text{cm}$ 的紊强 $\tau_{ub} = \frac{\sqrt{Db}}{U_b}$ 。

图 5 为宽尾墩 KWT—Ⅰ 与直尾墩在流量 $Q=20.47\text{l/s}$ 时的底部流速紊强沿程变化。 X_3-X_2 即为跃后长度 L_{jj} 。

$L_{jj}/L_j=1.69\sim2.33$,由实测宽尾墩的跃后长度 L_{jj} ,建立与 $\beta, E_o/h_k$ 的关系,二元回归为
 $L_{jj}=(-2.95+15.93\beta+2.96E_o/h_k)h_k$

相关系数 $R=0.982$,可见相关良好,与实测值对比最大误差 6.75%。

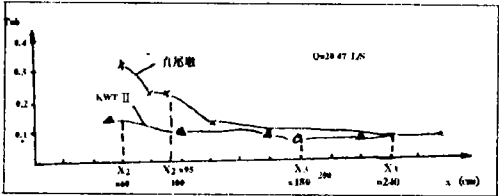


图 5 底部流速紊强

4 结束语

研究表明,低坝上的宽尾墩,只分选用合适的几何参数,则对下泄流量影响不大,但它可以明显地降低跃后水深、减小水跃长度及跃后长度,从而大大减少消力池及海漫长的工程量,因而宽尾墩在低坝上的应用前景十分广阔。

在本题目研究中,还提出了能量脉动概念,并进行了测量和分析,以及宽尾墩水面线的数值计算,限于篇幅,这里不再介绍,可参见文献(3)或研究生论文。

参 考 文 献

1 陈榕庭主编《高坝大流量泄洪建筑物》,1988年9月.水利出版社
2 辛玉传《低佛氏数水跃特性实验研究》硕士论文.郑州工学院1984
3 罗国杰、边恺元《能量脉动的概念及其测量》,水道港口,1994. 4. 第五届全国水利水电工程青年学术讨论会专集(三)。

The Study on Hydraulic Characters of Lower Dam
with Flaring Gate Piers

Luo guojie
(Institute of Reconnaissance, Planning, Desing &
Research, The Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou, 450003)
Bian Kaiyuan Wu Zhengxiang
(Zhengzhou University of Technology)

Abstract Flaring gate piers are one new type of dissipation energy work. This study results show that it can lower the water sequent depth and reduce the hydraulic jump length obviously.
Keywords Lower dam Flaring Gate Piers Dissipation energy