

窄缝式消能工的水力特性及其体型研究

陈忠儒, 陈义东

(长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要:研究窄缝坎挑流的水流特性、消能要求及其体型参数的选择. 窄缝使水舌出流挑角增大, 水舌纵向拉开, 形成水流变形耗能, 且加剧了水流紊动、水舌破碎而掺气的耗能, 使消能效果增加, 冲刷减少. 提供了不同收缩比与水舌出流挑角变化关系的试验成果及水舌纵向拉开值的估算公式.

关键词:消能工; 宽尾墩; 窄缝坎; 收缩比; 体型参数; 水力特性

中图分类号:TV131.61; TV653

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2003)02-0025-05

宽尾墩窄缝式消能工是一种新型消能工, 我国首先采用这种消能工的有潘家口水电站, 而后有龙羊峡、安康、东江、五强溪、岩滩、隔河岩及设计中的水布垭等大型水利枢纽. 经泄洪运行, 宽尾墩窄缝式消能工工作状态良好.

宽尾墩窄缝式挑坎不同于等宽挑坎, 它是借助于边壁的收缩, 促使水流变形且形成竖向扩张和纵向拉开, 加剧紊动掺气, 使水流有效碰撞, 提高消能效果, 减轻水流冲刷. 根据长江科学院对隔河岩、水布垭工程进行的整体模型和断面模型试验, 水流进入宽尾墩窄缝段, 由于宽尾墩的斜向挑射作用, 水流横向收缩. 在高流速的冲击下, 水流向前上方运行, 水面壅高, 水流沿尾墩壁向上爬高, 形成中间低、两侧高的“凹”面形状. 因而水舌的交汇点与冲击波的交汇点在立面上拉开一定距离, 故两薄片中间有一个开口空腔, 不断把空气卷入, 输送到水体内部. 同时, 出窄缝坎射流水舌上缘出射角及坝面泄流挑角显著增大, 水舌纵向拉开, 水舌上缘射距大大增加.

为使窄缝挑流在各种来流条件下实现充分碰撞并有良好的扩散流态满足消能, 需研究相应的窄缝体型. 根据我们的试验研究:

a. 边壁的收缩应适当, 两侧水流既要充分碰撞, 又不使上缘水舌过分弯曲跌落打击水舌, 造成水舌挑距缩短.

b. 挑坎内水流冲击波交汇碰撞, 尽可能使表面水花近乎垂直地飞溅, 窄缝挑流水舌成“扫帚状”, 而不使收缩角太大, 窄缝太小, 以致出射水流挑角增大, 挑距反而缩短, 入水能量集中, 消能效果不好. 控

制水流外缘出射角 35° 为宜.

c. 水舌下缘挑距受挑坎底面控制, 既要考虑射程不宜太短, 否则会威胁鼻坎安全, 又要考虑纵向拉开充分扩散.

d. 冲刷坑浅, 冲坑最深点距鼻坎距离合适, 虚坡(冲坑最大深度与最深点离鼻坎距离之比)小于或等于 $1/3$.

e. 经碰撞后的挑流水舌不宜出现紧密实体水股, 应充分破碎, 分散成水滴, 呈半透明状, 掺气充分.

1 宽尾墩窄缝式挑坎体型

研究表明, 矩形窄缝出口断面比垭口“Y”形窄缝出口断面好, 故对此作进一步探讨.

1.1 收缩比及收缩率

收缩比 β 是窄缝出口断面宽度 b 与收缩起始断面宽度 B 之比, 即 $\beta = b/B$; 收缩率 $n = (1 - b/B) \%$. 侧收缩角 α , $\tan \alpha = (B - b)/(2l_a)$, l_a 为收缩段长度.

国内已建水利工程的收缩比: 龙羊峡 $\beta = 0.38$; 东江 $\beta = 0.25$; 岩滩 $\beta = 0.368$; 安康 $\beta = 0.40$; 隔河岩 $\beta = 0.25$; 水布垭 $\beta = 0.25$. 侧收缩角: 五强溪 $\alpha = 16.699^\circ$; 龙羊峡 $\alpha = 7.294^\circ$; 东江 $\alpha = 4.764^\circ + 9.462^\circ$; 隔河岩 $\alpha = 12.68^\circ$; 岩滩 $\alpha = 16.699^\circ$; 水布垭 $\alpha = 12.680^\circ$. 收缩角 α 在 $7.294^\circ \sim 16.699^\circ$ 范围内.

李桂芬等^①在挑坎以上坝高 P 与堰上水头 H 之比 (P/H) 为 $6.7 \sim 19.1$ 的试验条件下, 提出最大收缩比的经验公式

作者简介: 陈忠儒(1934—), 男, 湖南东安人, 高级工程师, 从事水工水力学模型试验研究.

①李桂芬, 高季章. 狭谷河段枢纽(拱坝)泄洪、消能形式. 水利水电科学研究院, 1991年6月.

$$(b/B)_{\max} = 4h_i = 4K^{2/3} \quad (1)$$

式中: h_i 为相对临界水深, $h_i = \sqrt[3]{q^2/g} / H$ (H 为挑坎以上水头); K 为流能比 ($K = q/(g^{1/2} E^{2/3})$, 其中, E 为上下游水位差, q 为收缩前断面单宽流量).

根据对隔河岩、东江等水利枢纽的一系列模型消能防冲试验和几年来原型泄洪运行资料的总结研究, 在 $Fr = 5.3 \sim 7.9$ 时, 得出了符合前述“消能要求”流态较好的最大收缩比经验关系式:

$$(b/B)_{\max} = (1.0 \sim 1.2) Fr^{1/2} K^{2/3} \quad (2)$$

式中: Fr 为收缩起始断面佛劳德数.

根据隔河岩模型试验和原型泄洪观测, 当最高库水位为 199.24 m, 落差 67.0 m, 单宽流量为 $241.9 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$, 侧墙收缩角 12.68° , 收缩长度 20 m 时, 以及根据东江模型试验和原型泄洪观测, 当水位为 282.0 m, 落差 91 m, 单宽流量 $120 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$, 收缩长度 30 m 时, 收缩比为 0.25 是合适的.

1.2 收缩段长度

在一定水流条件下, 为使水流沿纵向扩散, 相应有一个最优的侧收缩段长度. 侧收缩段过长, 两侧水流碰撞效果差; 侧收缩段过短, 两侧水流碰撞效果好, 但水流对墩尾的水平推力过大, 影响坝体结构安全. 目前国内已建工程的侧收缩段长度为^[1]: 龙羊峡 25 m (右坎), 25 m (中坎), 31.2 m (左坎); 东江 30 m; 岩滩 20 m; 五强溪 20 m; 隔河岩 20 m; 水布垭 25 m. 国外阿尔曼德拉左岸溢流泄槽 27.82 m. 侧收缩段长度在 20 ~ 31.2 m 范围内.

当收缩比 $\beta \geq 0.50$, 收缩段长度可以缩短, 如李家峡 $\beta = 0.70$, 泄槽直墙转弯挑坎收缩段长度为 16.4 m.

1.3 窄缝出口单宽流量

目前国内工程的窄缝坎出口单宽流量为: 龙羊峡 $484 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$, 东江 $552 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$, 隔河岩 $619 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$, 水布垭 $611 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; 国外阿尔曼德

拉左岸溢洪道直泄槽为 $620 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. 变化范围为 $484 \sim 620 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$.

1.4 窄缝坎挑角 θ_2

选择窄缝坎挑角, 除应考虑水舌射程, 还应考虑空中有充分的纵向扩散, 这就要求出坎水流沿竖向流速方向的变化要大, 从而使水舌内缘挑距 l_1 适当小, 外缘挑距 l_2 尽量大, 又使碰撞消能尽可能大, 而 θ_2 是通过调整收缩比 β 及收缩率 n , 使外缘水舌挑角 θ_2 保持 35° 左右. 目前各工程运用 $\theta_2 = -14^\circ \sim 10^\circ$, 以 0° 居多. 外缘水舌挑角 θ_2 的形成及大小, 将在下面介绍.

1.5 β (或 n) 和 α 的选择

选择 β (或 n) 和 α , 实际是合理确定 b 和 l 的问题. 水布垭枢纽 1/100 整体模型陡槽溢洪道挑流试验进行了收缩段长度 25 m, b 分别为 15 m, 7.5 m, 5.25 m, 3.75 m 四种窄缝出口宽度及相应 β 为 1.0, 0.50, 0.35, 0.25 的试验^[2], 对应上游水位 397.0 m, 398.0 m, 400.85 m, 单孔流量 $2160 \text{ m}^3/\text{s}$, $2291.4 \text{ m}^3/\text{s}$, $2440 \text{ m}^3/\text{s}$, 试验成果见表 1.

试验表明, 当 $\beta = 0.50$ 时, 形成不了良好的水舌纵向拉开. 以上游水位 398.01 m, 397.0 m 为例, 纵向拉开为 70 m, 75 m, 约为等宽挑坎的 2 倍, 而 $\beta = 0.35$ 时为 80 ~ 100 m, $\beta = 0.25$ 时为 130 ~ 150 m. β 越小, 纵向拉开越大, 水舌外缘距离更远. 在相同坎高条件下, 窄缝坎将水舌从横向缩窄为纵向“拉开”. 当 $\beta = 0.25$ 时, 能满足流量 $10800 \text{ m}^3/\text{s}$ 的消能标准要求, 但在上游水位 400.85 m, 窄缝水股外缘水舌弯曲, 墩尾水股竖向冲向高度 32 m 以上, 对墩尾的水平推力将显著增加, 应加固其结构.

收缩率 n 以百分数计, 已建水利工程的收缩率 n 为: 岩滩 $n = 63.2$; 东江 $n = 75$; 安康 $n = 60$; 龙羊峡 $n = 62$; 五强溪 $n = 63.2$; 隔河岩 $n = 75$; 水布垭 $n = 75$.

表 1 水布垭溢洪道 1/100 模型 β 与 Δl 及冲刷深度试验成果

$\beta = \frac{b}{B}$	窄缝宽度 b/m	缩窄宽度 $(B-b)/\text{m}$	$\tan \alpha$	泄流孔 编号	上游水 位/ m	水舌挑距/ m			冲刷坑最深 点高程/ m	冲刷坑最 深点离鼻 坎距离 l_0/m
						l_1	l_2	$\Delta l = l_2 - l_1$		
1.0	15	0	0	2, 4	398.01	120	150	30	156.0 (左岸)	160
1.0	15	0	0	3	397.00	110	140	30	156.0 (左岸)	160
1.0	15	0	0	3	398.01	130	160	30	156.0 (左岸)	160
1.0	15	0	0	3	397.00	125	155	30	156.0 (左岸)	160
0.50	7.5	7.5	8.5308	2	398.01	100	175	75	160.8 (右岸)	235
0.50	7.5	7.5	8.5308	2	397.00	80	150	70	160.8 (右岸)	235
0.35	5.25	9.75	11.0342	2	398.01	100	205	105	165.4 (靠右岸)	270
0.35	5.25	9.75	11.0342	2	397.00	100	190	90	165.4 (靠右岸)	270
0.25	3.75	11.25	12.6804	1 ~ 5	400.85	90	240	150	172.9 (靠右岸)	340
0.25	3.75	11.25	12.6804	1 ~ 5	398.01	80	230	150	172.9 (靠右岸)	340
0.25	3.75	11.25	12.6804	1 ~ 5	397.00	80	210	130	172.9 (靠右岸)	340
0.25	3.75	11.25		1 ~ 5	402.00	90	240	150	169.7 (靠右岸)	

2 水舌纵向拉开的估算

根据一系列模型试验资料,对窄缝水舌纵向拉开的挑距计算,已得到一些初步成果。

对于等宽挑流鼻坎,其水舌射程按质点抛物线运动轨迹考虑(图 1),其射距公式为

L = \varphi^2 S \sin(2\theta_1) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{a}{\varphi^2 S \sin \theta_1}} \right) \quad (3)

式中: S 为上游水位至鼻坎顶水深中心点距离; a 为下游水位至鼻坎顶水深中心点距离; L 为水舌挑距,采取内、外缘 l_1, l_2 射距,按下游水面计算; \theta_1 为鼻坎挑角; \varphi 为水舌流速系数。

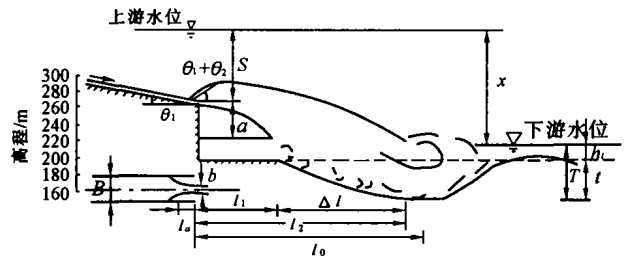


图 1 窄缝挑流水舌拉开计算简图

式(3)适合于鼻坎挑角大于 0^\circ。在鼻坎挑角为 0^\circ 时,根据文献[3]提供的 \theta = 0^\circ, n_c = a/(S + a) = 0.30, \frac{L}{\varphi^2(S + a)} 曲线图,可按以下关系式求水舌挑距:

L = 0.98 \varphi^2 (S + a) \quad (4)

用宽度为 15 m 的等宽泄槽模型,试验实测挑距 l_1, l_2, 推算出相应的 \varphi_1, \varphi_2 值(表 2)。在窄缝挑流射距 l_1, l_2 计算时参照 \varphi_1, \varphi_2 系数进行。

为应用方便,计算时采用水舌中心 \varphi, \varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)/2, 则 \varphi_1 = \alpha_1 \varphi, \varphi_2 = \alpha_2 \varphi, 其中 \alpha_1, \alpha_2 为流速系数转换系数,其值见表 3。

水舌外缘挑角, \theta_2 当 \beta 变小而增大,在 \beta 为 1.0, 0.50, 0.35, 0.25, 上游水位 400.85 m, 398.01 m, 397.0 m 时,各种挑坎 q 条件下,相应下游水位 220.00 m, 222.00 m, 224.05 m, 测得窄缝段沿程水深递增,且因距墩末端 16 ~ 40 m 水位变化幅度不大,自由水面坡度平缓,而在 0 ~ 16 m 范围内水深变化幅度大,自由水面坡度变陡、水面曲率大的这一水面形状,我们以窄缝出口处水深为 h_2, 而与相应等宽

处或缩窄前的 B 处水深 h_1, 两者之差即为窄缝增加的水深 \Delta h = h_2 - h_1, 并除以水深递增段的距离 l_a 即为出射角 \tan \theta = \tan(h_2 - h_1)/l_a, 便得不同 \beta 和 \theta_2 的关系曲线(图 2), 即以此 \theta_2 作纵向拉开计算用。

表 3 流速系数转换系数

挑角	上游水位	水位差	单孔流量	流速系	流速系数转换系数	
\theta_1/(^\circ)	/m	/m	/(m^3 \cdot s^{-1})	数 \varphi	\alpha_1	\alpha_2
0	398.01	176.01	2 291.4	0.867	0.928	1.072
0	397.00	177.00	2 160.0	0.828	0.920	1.081
10	398.01	176.01	2 291.4	0.838	0.958	1.041
10	397.00	177.00	2 160.0	0.796	0.956	1.043

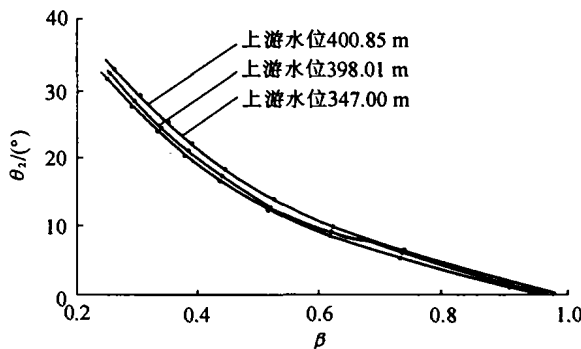


图 2 窄缝坎(\theta_1 = 0^\circ) \beta 与 \theta_2 关系曲线

为计算窄缝挑流纵向拉开距离,对水舌外缘在式(3)的基础上增加一个出射角 \theta_2, 则得窄缝挑流纵向拉开距离 l_2, 式(3)可写成:

l_2 = \varphi_2^2 S \sin 2(\theta_1 + \theta_2) \left[1 + \sqrt{1 + \frac{a_2}{\varphi_2^2 S \sin^2(\theta_1 + \theta_2)}} \right] \quad (5)

式中: a_2 为下游水位至窄缝出口水深中心点距离; \theta_2 为窄缝坎出射角,根据 \beta 值由图 2 查出。

从式(3)(或(4))与式(5)可得出水舌在下游水面落点及其在水面的拉开长度 \Delta l = l_2 - l_1, 即

\Delta l = \varphi_2^2 S \sin 2(\theta_1 + \theta_2) \left[1 + \sqrt{1 + \frac{a_2}{\varphi_2^2 S \sin^2(\theta_1 + \theta_2)}} \right] - \varphi_1^2 S \sin 2\theta_1 \left[1 + \sqrt{1 + \frac{a_1}{\varphi_1^2 S \sin^2 \theta_1}} \right] \quad (6)

当已知等宽度鼻坎挑流水舌入水厚度 \delta 时,因其与窄缝挑坎水舌拉开值存在倍数关系,因而可用下式计算

表 2 收缩前水舌挑距流速系数

挑坎孔号	挑角 \theta_1/(^\circ)	上游水位 /m	下游水位 /m	单孔流量 /(m^3 \cdot s^{-1})	挑坎 q /(m^2 \cdot s^{-1})	挑流射程/m		水舌内外缘流速系数	
						内缘	外缘	\varphi_1	\varphi_2
2,4	0	398.01	222.00	2 291.4	152.74	114	150	0.805	0.929
2,4	0	397.00	220.00	2 160.0	144.00	110	140	0.756	0.895
3	10	398.01	222.00	2 291.4	152.74	130	160	0.803	0.872
3	10	397.00	220.00	2 160.0	144.00	120	155	0.761	0.830

表 4 纵向拉开外缘射距计算值与实测值比较

β	$\theta_1/(\circ)$	$\theta_2/(\circ)$	上游水位 /m	窄缝坎 q /($m^2 \cdot s^{-1}$)	S_2	a_2	外缘射距/m		内缘射距/m		纵向拉开长度 Δl /m	
							计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值
0.50	0	12.3726	398.01	305.52	130.77	45.24	181.9	175	112	100	69.9	75
0.50	0	11.7225	397.00	288.00	129.95	47.05	176.1	170	100	98	76.1	72
0.50	10	12.3726	398.01	305.52	130.07	45.75	195.3	180	130	120	65.3	60
0.50	10	11.7225	397.00	288.00	129.25	47.75	192.4	175	120	115	72.4	75
0.35	0	22.4161	398.01	436.5	129.27	46.74	195.4	190	120	110	75.4	75
0.35	10	22.4161	398.01	411.4	128.78	47.54	214.5	215	130	120	84.5	95
0.35	0	21.3679	397.00	436.5	128.57	47.74	204.0	206	110	100	94.0	106
0.35	10	21.3679	397.00	411.4	128.48	48.52	183.9	190	120	110	63.0	80
0.25	14.41	35.1360	400.85	650.7	128.71	45.34	231.6	240		90		150
0.25	14.41	33.7924	398.01	611.0	127.17	48.84	223.0	230		80		150
0.25	14.41	32.4165	397.00	576.0	126.56	50.44	209.7	210		80		130

$$\Delta l = k_c \frac{\delta}{\beta} \quad (7)$$

式中: δ 为等宽挑流入水厚度; k_c 为扩散系数(取 1.0 ~ 1.1)。

由式(6)可以明确以下概念: θ_1 是控制水舌内缘挑距, θ_2 是控制水舌外缘挑距; θ_1 愈小, θ_2 愈大, 则纵向拉开长度 Δl 愈大; θ_1 不变时 (θ_1 在 $-14.4^\circ \sim 10^\circ$ 范围), θ_2 愈大, 则纵向拉开长度愈大; $\theta_1 + \theta_2$ 在 45° 以下或 $\theta_2 < 35^\circ$ 较合适, 否则纵向拉开长度增加缓慢。

当 $\theta_1 = 0^\circ$, 则由式(2)求出内缘 l_1 和由式(3)求出外缘 l_2 , 即可求得水面落点及纵向拉开长度。

现将某工程岸边溢洪道窄缝挑流在 β 分别为 0.50, 0.35, 0.25; θ_1 分别为 $0^\circ, 10^\circ, -14.41^\circ$ 及相应 θ_2 的纵向拉开长度计算结果与实测值进行比较(表 4), φ_2, φ_1 选用 $\beta = 1.0$ 时相应的鼻坎形式推算的流速系数。

由上述研究、比较可知:

a. 本文提供的外缘出射角 θ_2 是一个新概念, 它与 β 的变化关系是通过一系列模型试验得出的, 该值可供设计计算选用。在挑坎至堰顶的高程 P 与堰上水头 H 之比为 5.8 ~ 9.6 的试验条件时, θ_2 值见表 5。

表 5 β 与 θ_2 的变化关系

β	$\theta_2/(\circ)$	β	$\theta_2/(\circ)$
1.00	0	0.325	23.4784 ~ 25.7560
0.50	11.7225 ~ 13.0308	0.30	26.0471 ~ 28.5772
0.45	13.5973 ~ 15.7664	0.275	28.9516 ~ 31.7072
0.40	16.7321 ~ 19.1304	0.25	32.4165 ~ 35.1360
0.35	21.3679 ~ 23.3885		

由于窄缝出口水深 h_2 随 β 及 h_1 而变化, 将本工程试验值化成无量纲形式, 以 h_2/h_1 为纵坐标, β 转换成 $1/\beta$ 为横坐标, 绘于笛卡尔坐标系内(图 3), 成直线关系, 可得到 $h_2 = (1/\beta)h_1$, 并将此值代入出射角 $\theta_2 = \cot[(h_2 - h_1)/L]$ 中, 即

$$\theta_2 = \cot\left[\frac{(1/\beta)h_1 - h_1}{L}\right] = \cot\left(\frac{h_1 - \beta h_1}{\beta L}\right) \quad (8)$$

根据本工程模型试验结果可取 $L \approx 16$ m, 并将式(8)化简成下式:

$$\theta_2 = \cot\left[\frac{0.0625}{\beta}(h_1 - \beta h_1)\right] \quad (9)$$

这样就可式(9)计算任意收缩比 β 条件的 θ_2 。

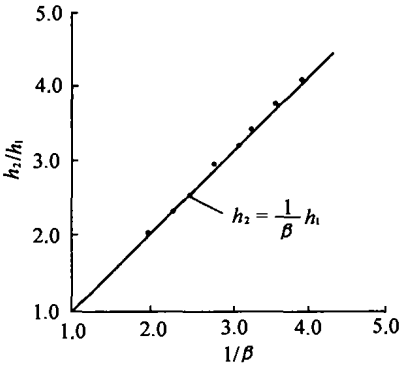


图 3 $h_2/h_1 \sim 1/\beta$ 关系曲线

b. 纵向拉开长度 Δl 是通过水舌内、外缘入水落点求得的。其内、外缘射距 l_1, l_2 的计算采用 $\varphi_1 = 0.76 \sim 0.81, \varphi_2 = 0.872 \sim 0.929$, 所得计算结果与试验值基本一致。说明该式是可以用的, 并能满足精度要求。

3 下游河床的冲刷变化

下游河床冲刷变化受窄缝收缩比的影响, 纵向拉开的窄缝挑射水流, 其冲刷深度随 β 的变化而变化, 在 $\beta = 1.0, 0.50, 0.35, 0.25$ 的试验条件下, 其冲刷高程依次为 156.0 m, 160.8 m, 165.4 m, 172.9 m, 相应冲刷深度按河床高程 200.0 m 计, 分别为 44.0 m, 39.2 m, 34.6 m, 27.1 m。缩窄至 $\beta = 0.25$ 时的冲刷较未缩窄 ($\beta = 1.0$) 时的冲刷深度减少 16.9 m, 相应冲坑浅 38.4%。冲刷最深点离坎脚距离分别为 160 m, 235 m, 270 m, 340 m, 即离鼻坎愈来愈远。在 $\beta = 0.25$ 时较 $\beta = 1.0$ 的距离增大 1 倍多。这是由于被缩窄出口的那部分横向水体“搬移”到纵向上, 形成了“纵向

拉开”。其拉开值与缩窄值基本一致。如缩窄比0.25, 则拉开长度为4倍, 所以冲刷减轻, 对河床消能防冲有利。

4 尾墩压力变化

窄缝底板上沿中心线的压力如图4所示, 3号孔压力随流量增加而增大, 在单孔流量 $22.91 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大压力测点15位置离出口15 m处, 与未缩窄坎相比, 压力增大约4倍, 这种差异是由于 β 变化使窄缝坎水深增大, 自由水面曲率增大所致。

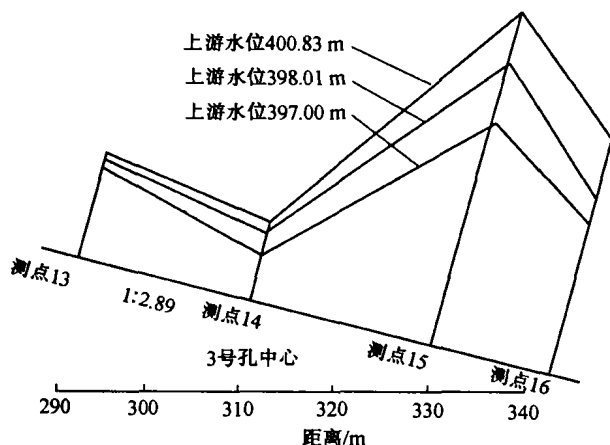


图4 3号孔窄缝鼻坎中心压力分布

图5是宽尾墩侧墙上的压力等值线图, 侧墙上最大压力部位与底坎中心线压力一致。在 $\beta = 1.0$ 时距墩末端27.0 m处31号测点的压力为150 kPa, 而在 $\beta = 0.25$ 时窄缝中部(距墩末端13 m)31号测点处的压力则为371 kPa, 在观测流量范围内, 压力普

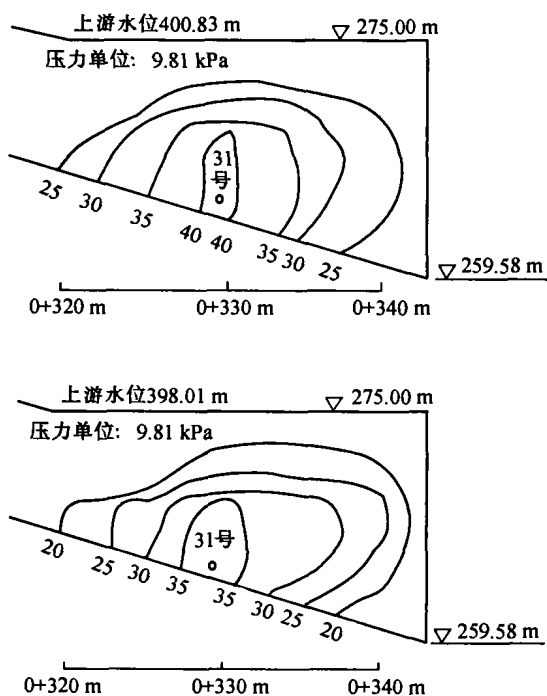


图5 宽尾墩侧墙压力等值线

遍增大1倍多。宽尾墩侧墙上的压力比常用未缩窄坎大得多, 且一分力将侧墙推向下游。因此在选择收缩比, 以及墙的结构稳定计算中应予以注意。

5 结 语

a. 窄缝挑流鼻坎是适用于狭谷高坝大流量泄流的新型消能工。窄缝挑坎与等宽挑坎虽然都是挑流消能工, 但两者的消能特性是有区别的。等宽挑流仅仅是下泄水流能平顺地抛射出去, 经空中自然掺气、紊动和空气阻力消耗能量后, 布满全河断面进入下游河床, 故冲刷严重。而窄缝挑流是利用宽尾墩侧墙收缩, 使两侧水流碰撞后竖立向前运动而消能, 将被缩窄的那部分(大量的)过流水股“搬移”到水舌前沿成为“纵向拉开”, 并由此引起水舌外缘出射角增大, 因而形成了水流变形耗能, 且加剧了水流紊动、水舌破碎而掺气的耗能, 使消能效果明显增加, 而冲刷显著减少(一般比等宽挑流减少30%~55%, 水布垱工程减少38.4%)。可见窄缝式挑坎不失为一种新型高效的消能工。

b. 经窄缝收缩, 水舌纵向拉开, 当利用式(2)确定水流的收缩比 β 时, 可望得到良好的消能效果。

c. 本文提供的窄缝式挑流水舌内、外缘的射距及相应的纵向拉开值的计算公式(4)~(6), 其中 φ_1 因受窄缝影响稍微变小, 可取 $\varphi_1 = 0.76 \sim 0.81$, $\varphi_2 = 0.872 \sim 0.930$ 。这样计算的精度能满足设计要求。

d. 窄缝式挑坎挑角 θ_1 是水舌内缘射距控制角, 取 $-14.0^\circ \sim 10^\circ$ 为宜; θ_2 为水舌外缘纵向拉开的控制角, 本文提供的值可供设计时选用, θ_2 取小于或等于 35° 为宜。

e. 窄缝挑坎的单宽流量, 应考虑宽尾墩高度尺寸及高速水流对墩尾的侧向和顺流向水平推力, q 取 $600 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 以下为宜。

(参加本文试验的人员有: 高仪生、陈俊、曾泳、石含英、陈忠儒等; 感谢黄国兵、焦春文、高仪生高级工程师对本文提出宝贵意见。)

参考文献:

- [1] 王治祥. 窄缝式挑坎消能与体型问题讨论. 松辽水利委员会水利科学研究院. 泄水工程与高速水流论文集. 成都: 成都科技大学出版社, 1994.
- [2] 高仪生. 清江隔河岩水利枢纽泄洪布置和消能防冲试验研究[A]. 长江科学院. 泄水工程与高速水流情报网第三届全网大会论文集[C], 1990.
- [3] 布塔柯夫 A B. 挑流式泄水建筑物鼻坎最优高度计算[J]. 水利技术通讯, 1982(2).

(收稿日期: 2001-11-12 编辑: 马敏峰)