

高水头水电站“三洞合一”布置的体型优化试验

李贵吉¹ , 张建民¹ , 许唯临¹ , 王承恩¹ , 周鸿汉²

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 四川 成都 610065 ;
2. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院 四川 成都 610072)

摘要 : 针对某水电站坝址河道狭窄现状 , 采用放空洞、旋流竖井泄洪洞与导流洞“三洞合一”技术优化枢纽布置。通过模型试验 , 分析旋流竖井泄洪洞泄流能力及相关水力特性 , 评价了结构尺寸设计的合理性。提出在放空洞连接段采用曲线型阶梯消能工的措施 , 通过试验得到了优化体型。研究表明 , 采用曲线型阶梯消能工后 , 连接段流态平稳 , 水流掺气充分 , 并且消能效果显著 , 在单宽流量为 $54.3 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$ 时阶梯段的消能率达到了 43%。在洞内连接段布置阶梯消能工可有效改善枢纽布置。

关键词 : 放空洞 ; 旋流竖井 ; 泄洪洞 ; 导流洞 ; “三洞合一”技术 ; 消能工 ; 枢纽布置

中图分类号 : TV74 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-7647(2009) 05-0054-07

Experimental study on shape optimization of three-in-one diversion tunnel in high-head hydropower station // LI Gui-ji¹ , ZHANG Jian-min¹ , XU Wei-lin¹ , WANG Cheng-en¹ , ZHOU Hong-han² (1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering , Sichuan University , Chengdu 610065 , China ; 2. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute , China Hydropower Consulting Group , Chengdu 610072 , China)

Abstract : Because of the narrow river channel in a hydropower station dam site , the three-in-one technology , which combines an emptying tunnel , a flood discharge tunnel with a spiral flow shaft and a diversion tunnel , is used , through which the hydro-junction layout has been optimized. The discharge capacity and hydraulic characteristics of the flood discharge tunnel with a spiral flow shaft were analyzed through a model test , and the rationality of the structural design was evaluated. The curvilinear stepped energy dissipator was used at the connecting section of the emptying tunnel. The optimization style was obtained. Results show that the flow at the connecting section is stationary and fully aerated and the energy dissipation has an obvious effect. The energy dissipation rate of the curvilinear stepped energy dissipator is about 43% when the unit discharge is $54.3 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$. The stepped energy dissipator used at the connecting section in tunnel can improve the hydro-junction layout.

Key words : emptying tunnel ; spiral flow shaft ; flood discharge tunnel ; diversion tunnel ; three-in-one technology ; energy dissipator ; hydro-junction layout

旋流竖井消能工具有结构简单、布置灵活、消能率高的特点 , 它可以利用原导流洞 , 又能适应复杂的地形地质条件。国外从 19 世纪 40 年代开始就进行了相关研究 , 意大利、法国、前苏联等已有广泛应用^[1-4]。在国内旋流竖井消能工在沙牌水电站^[5]、公伯峡水电站^[6]等也有应用。已有理论研究和实践经验表明 , 旋流竖井消能工是一种适宜于中、高水头和中、小流量的新型消能措施 , 是高坝施工导流洞改建为泄洪洞的一个可行方案^[7-12]。放空洞一般具有工作水头高、流速大、上游水位变幅大等特点 , 它进口位置较低 , 若后部分利用原导流洞需要设置一个连

接段 , 以往都是采用渥奇曲线连接的方式 , 但此方式对施工要求高 , 并需设置必要的掺气设施^[13]和布置消力池等消能设施。

“三洞合一”技术已经在仁宗海、狮子坪、斜卡、溪古^[14]等电站得到了成功应用。某水电站旋流竖井泄洪洞、放空洞、导流洞采用“三洞合一”技术 , 其平面布置如图 1 所示。该电站位于一个狭窄河谷中 , 最大坝高 176 m。旋流竖井泄洪洞为非常泄洪洞 , 后段采用平面交叉方式与原导流洞结合 , 放空洞前段为圆形有压洞 , 后段与原导流洞结合。由于该水电站原导流洞出口左岸存在一个滑坡体 , 需要控

制导流洞出口水流流速,减小对岸边的冲刷。为了避免在导流洞出口处设置消力池,提出在放空洞连接段采用阶梯消能措施。阶梯消能工是一个古老而又先进的消能设施,国内外许多学者对其水力特性进行了深入的研究,取得了相当多的成果^[15-22]。采用阶梯消能工程的工程实例很多,如美国1987年竣工的上静水坝^[18],中国2001年建成的大朝山水电站等^[23]。阶梯消能工具有结构简单、消能率高等特点。但是以往的研究主要是针对溢流坝或溢洪道,洞内阶梯消能工具有自身的特点,需要对阶梯的布置形式进行相关的研究。本文提出了曲线型阶梯消能工的布置形式。

1 模型试验设计

模型试验选择该水电站“三洞合一”布置方案(图1),按重力相似准则设计,采用有机玻璃制作,模型比尺为1:30,试验工况如表1所示。

表1 试验工况

工况	流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	
	旋流竖井	放空洞
1	185.87	100.00
2	213.06	150.00
3	308.01	170.00
4	347.72	190.00

图2为旋流竖井体型示意图。竖井上平段宽6.0m,涡室进口宽3.7m,涡室直径10.5m,竖井直径7.0m。涡室内布置1个半径为3.0m的折流坎与上平段左边墙连接,竖井底部的消力井深10m。竖井下平段宽5m,压坡出口高4m。泄洪洞右边墙在交汇处前10m开始向内收缩至4m,左边墙在交汇处为半径120m、夹角160°的圆弧。在放空洞右边墙直墙高5m处布置1个半径1m、长40m的折流设施。

图3为放空洞各体型示意图,放空洞相关体型参数如表2所示。有压进口宽度为2.5m,连接段宽3.5m,原导流洞宽7.5m。体型1采用涅奇曲线连

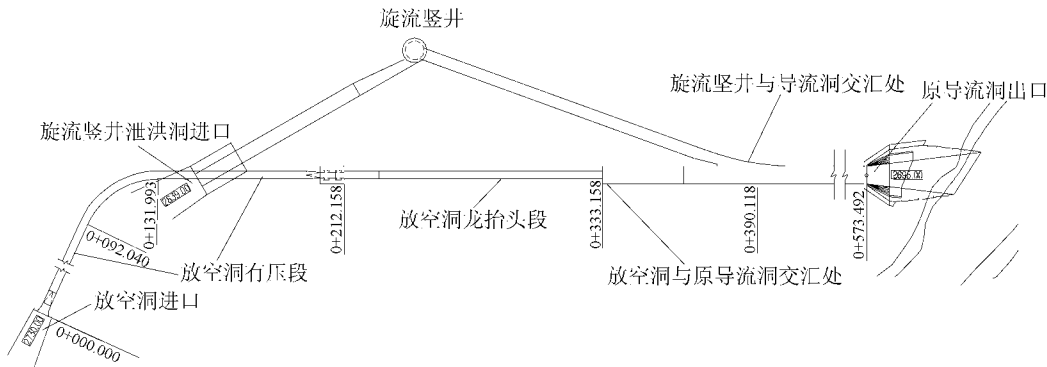


图1 “三洞合一”平面布置(单位:m)

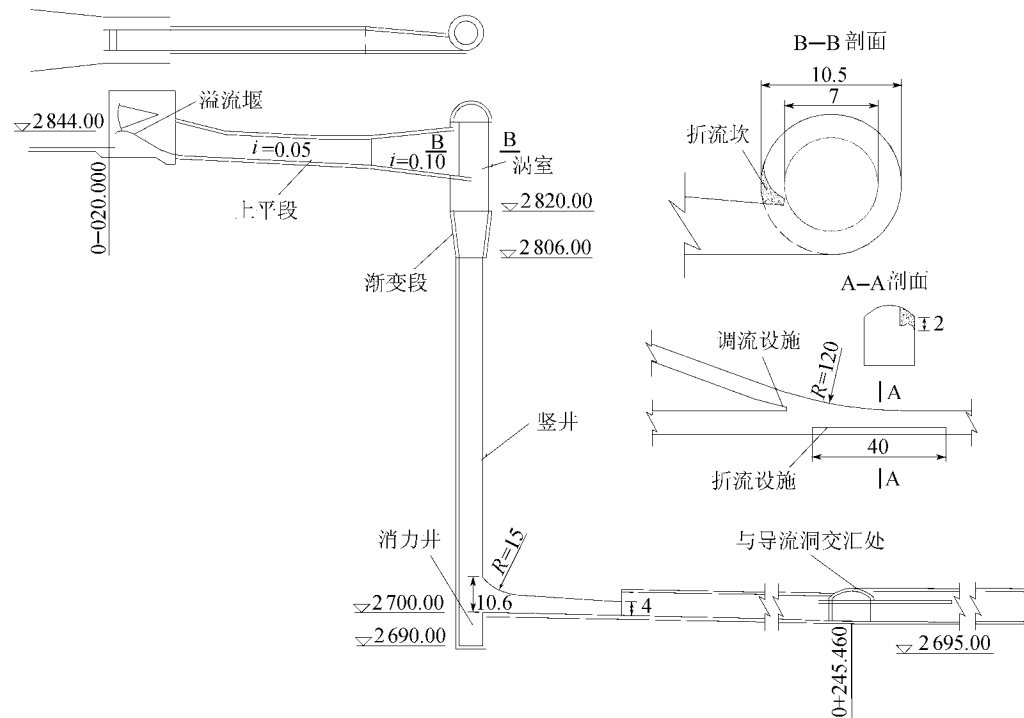


图2 旋流竖井体型示意图(单位:m)

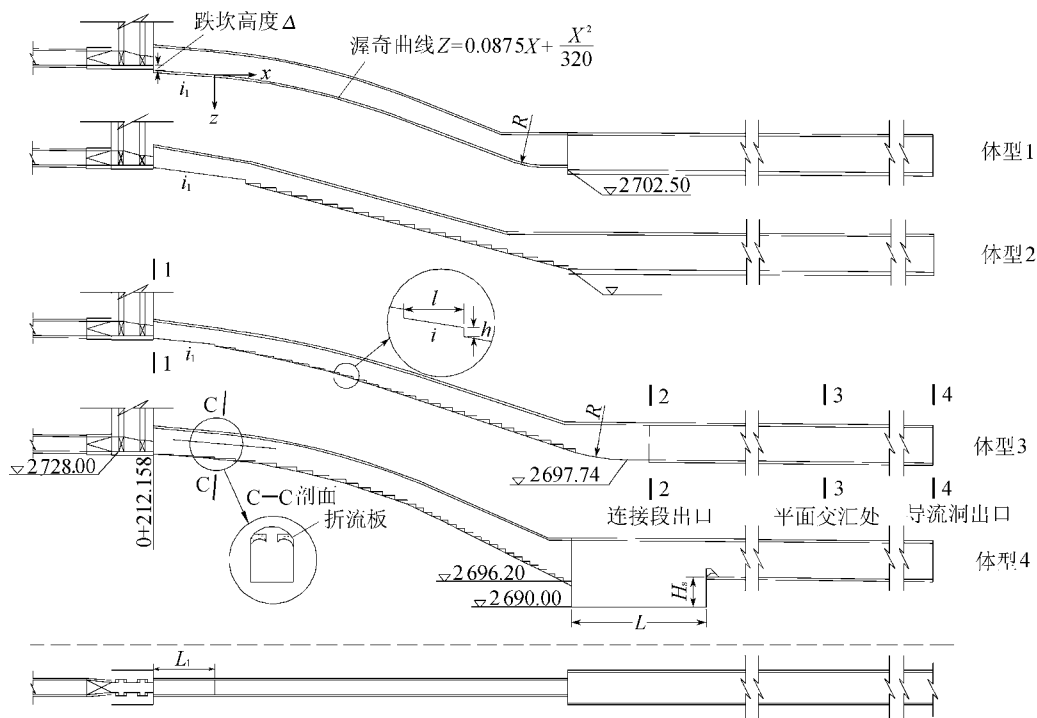


图3 放空洞各体型示意图(单位:m)

接。体型2采用短斜坡+水平等高阶梯,连接段出口无反弧连接。体型3采用短斜坡+斜面阶梯+水平阶梯结合的布置形式。体型3前面有10个斜面阶梯,阶梯高度为0.5m,阶梯长度由5m变化到3m;然后接4个长3m的过渡阶梯,阶梯高度分别为0.6m、0.7m、0.8m和0.9m,再接12个长3m、高1m的水平阶梯。体型4将连接段做成外包面为曲线的水平阶梯,连接段宽度增大为4.5m,阶梯后接1个长50m、深7m的消力池。所有体型在连接段进口处都是1个突扩突跌掺气坎,类似前人研究的阶梯前置掺气坎^[19]。

2 旋流竖井泄洪洞水力特性

2.1 泄流能力

前人对旋流竖井泄洪洞的泄流能力做了相关的研究^[10-11]。旋流竖井泄洪洞进口采用WES堰,其泄流能力受溢流堰过流能力、涡室进口宽度、竖井尺寸及出口压坡高度的控制。泄洪洞全开时流量按式(1)计算:

$$Q = mB \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (1)$$

式中: m 为流量系数; B 为闸门宽度; H 为堰上水头。经测量,溢流堰流量系数在0.42左右,泄流能力满足设计要求。

涡室进口宽度是控制流量的“瓶颈”之一,要保证涡室在小流量能起旋,在大流量下进口不出现较大的雍水。该方案中涡室进口宽度为3.7m,上平段底坡由 $i=0.05$ 变化到 $i=0.10$ 。试验发现,小流量下水流能起旋,在大流量情况下进口处出现少量雍水,进口宽度适当。

竖井的尺寸是影响泄流能力的主要因素。竖井的尺寸对竖井内空腔大小、壁面压力、水层厚度和掺气浓度有影响。根据董兴林等^[10]提出的经验公式计算后取竖井直径为7m。计算公式如下:

$$D = k \left(\frac{Q_m^2}{g} \right)^{0.2} \quad (2)$$

式中: D 为竖井直径; Q_m 为最大设计流量, m^3/s 。当 $Fr \leq 1$ 时,取 $k=1$;当 $Fr > 1$ 时,取 $k=Fr^{0.1}$,涡室直径 $D_w=1.5D$ 。

试验发现,在最大流量时竖井内都存在空腔,最小空腔在2m左右,竖井尺寸满足要求。

表2 放空洞各体型参数

体型	连接形式	结构特点	主要体型参数
体型1	渥奇曲线	2处掺气设施	$\Delta=0.5\text{ m}$, $\Delta_1=0.5\text{ m}$, $i_1=1:6$, $L_1=15\text{ m}$, $R=25\text{ m}$
体型2	斜坡+阶梯	水平等高阶梯	$\Delta=0.5\text{ m}$, $i_1=1:7.6$, $L_1=22\text{ m}$, $n=21$ 个, $h=1\text{ m}$, $l=3.74\text{ m}$ (无反弧)
体型3	斜坡+阶梯	斜面阶梯+水平阶梯	$\Delta=0.5\text{ m}$, $h=0.5\sim 1.0\text{ m}$, $L_1=15\text{ m}$, $l=3\sim 5\text{ m}$, $i_1=0.10$, $n=26$ 个, $R=40\text{ m}$
体型4	阶梯	阶梯后接消力池	$\Delta=0.5\text{ m}$, $h=0.3\sim 1.0\text{ m}$, $l=2\sim 5\text{ m}$, $n=35$ 个, $H_s=7\text{ m}$, $L=50\text{ m}$

注: Δ 为有压洞出口跌坎高度, Δ_1 为连接段出口跌坎高度, i_1 为调整段坡度, L_1 为调整段长度, h 为阶梯高度, l 为阶梯长度, n 为阶梯个数, R 为反弧半径, H_s 为消力池深度, L 为消力池长度。

竖井压坡出口高度对泄流能力影响较小,压坡主要是控制消力井水面高度和出口流速大小。由于压坡出口处一般都是掺气浓度很高的水流,通常控制出口流速在 20 m/s 以下,这样下游就可以减少或不用设置掺气和消能设施。压坡出口高度一般取 $0.5D \sim 0.6D$,该体型压坡高 4 m。

2.2 水流流态

试验发现,竖井上平段水流较平稳,水流进入涡室起旋后受折流坎作用,增加旋流角动量,避免了旋转水流与涡室进口来流直接碰撞而产生水壅封堵空腔。水流在旋转过程中其厚度逐渐减小,进入竖井中时,水流已经很分散,并且圆周速度很小,最后落入底部的消力井中。水流一般在竖井中旋转 2.5~4.0 圈,流量越大旋转圈数越多。消力井中水流处于旋转状态,紊动剧烈,掺气明显。随着流量的增加,消力井中水面逐渐升高,实测水垫深度为 22~35 m。足够的水垫深度保证了对下落水流的消能作用。

泄洪洞下平段掺气水流在大流量下有一定的波动,不过没有超过直墙。进入原导流洞的急流转弯处,调流装置将水流向左边墙引导,减小了水流对右边墙的冲击角度,原导流洞右边墙顶部布置的折流设施将水流反卷入导流洞中,防止了水流对洞顶和洞侧墙的冲刷。

2.3 竖井压强特性

竖井圆周 4 个方向布置了测压点,竖井壁面及压坡时均压强分布如图 4(a)(c)(e)所示。涡室及竖井壁面基本为正压,在渐变段和消力井段压强较大。在渐变段和水垫之间的竖井段,随着高程的降低,水流圆周速度减小,压强逐渐减小,压强的最小值在高程 2750.00 m 附近。竖井底板时均压强在 263.0~514.0 kPa 左右。竖井出口压坡段基本为正压,最小压强位于压坡的圆弧段,在圆弧与斜坡的交界处压强最大,然后压强逐渐减小。

竖井壁面脉动压强均方根 σ 如图 4(b)(d)(f)所示,竖井壁面 σ 最大值为 121.0 kPa 左右,位于高程 2826.00 m 处。消力井底板 σ 最大值为 52.7 kPa,压坡处 σ 沿程逐渐降低,由 41.2 kPa 逐渐减小到 3.5 kPa。

文献 [10] 提出了计算竖井壁面压强的公式:

$$\frac{p}{\rho g} = \frac{v_t}{g} \ln \frac{R}{R-d} \tag{3}$$

其中,沿径向 r 的环向速度取平均值 $v_t = v \cos \alpha$,空腔直径 $d = R - r$ 。水层越薄, $\ln \frac{R}{R-d}$ 就越小,计算的壁面压强越小,与实际观测值是吻合的。实测的壁面压强均为正值,最小值约为 $1.5 \times 9.8 \text{ kPa}$,未出现较大的负压。竖井尺寸在满足泄流时宜选用较小

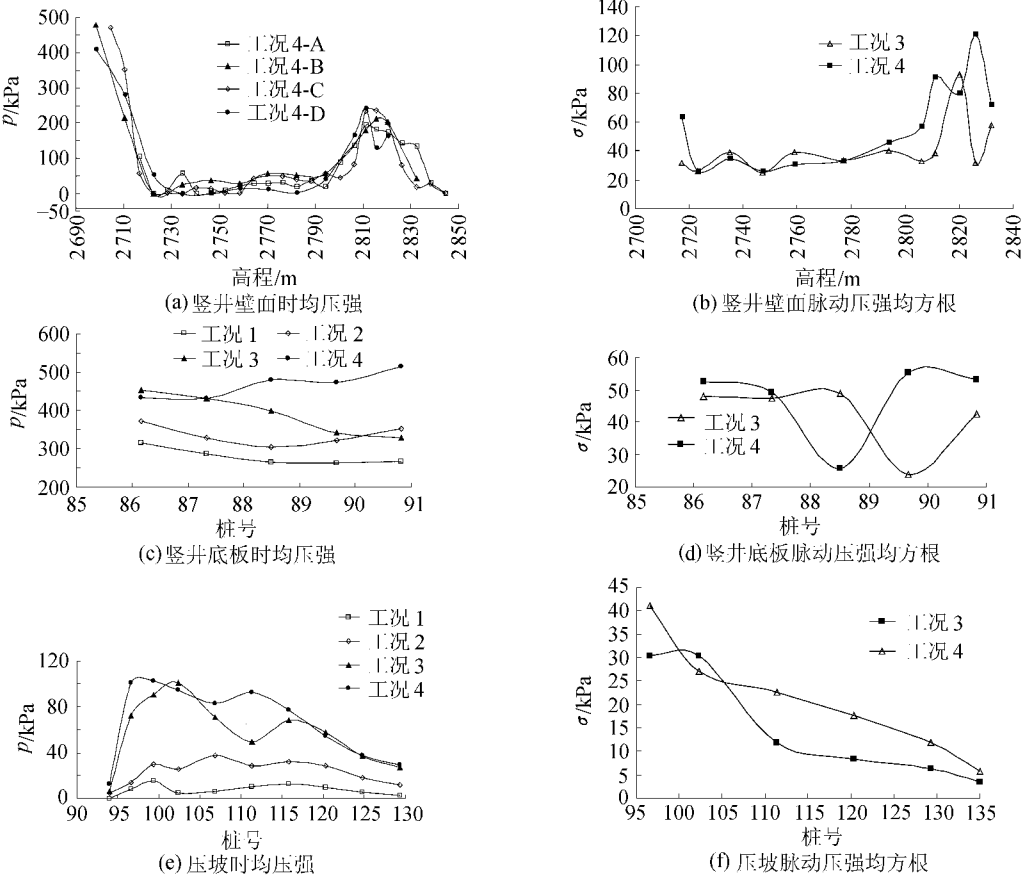


图 4 竖井壁面时均压强及脉动压强均方根分布

的直径,可以改善壁面的压强分布特性。表 3 是根据测量的压强和流速计算的水流空化数,由表 3 可知 随着高程的降低水流空化数降低,在高程低于 2760.00 m 时,空化数已经小于 0.20,但是由于竖井中下部水层较薄,水流掺气浓度较高,可以减少空化的可能性。消力井中水面高程大概在 2725 m 左右,为了提高这部分竖井的安全性可以考虑在 2760 m 高程处设置 1 个环状通气槽,提高壁面附近水流的掺气浓度。

表 3 竖井壁面空化数(工况 4)

高程/m	壁面压强/kPa	流速/(m·s ⁻¹)	空化数 σ_i
2806	136.70	23.00	0.78
2800	164.60	22.80	0.90
2788	57.80	25.50	0.39
2782	53.70	30.00	0.27
2776	50.80	31.00	0.25
2764	43.40	32.00	0.22
2758	34.30	34.00	0.18
2748	24.50	35.01	0.14

2.4 竖井消能率

旋流竖井的消能率可按下式计算：

$$\eta = \left(1 - \frac{z_2 + h_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{g}}{z_1 + h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{g}} \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中： η 为消能率； z_1 、 z_2 为计算断面的高程； h_1 、 h_2 为计算断面的水深； v_1 、 v_2 为平均流速； α_1 、 α_2 为动能修正系数 取 1.0。

选择导流洞出口高程为基准面。计算选择的断面见图 3。表 4 为各断面竖井泄洪洞消能率。由表 4 可知,竖井泄洪洞消能率在 2-2 断面(压坡出口)处达到 80% 以上,到达导流洞出口时加上沿程损失,总的消能率在 89% 以上,消能率随着流量的增加有所减小,消能率大小与类似工程相当^[5]。导流洞出口最大流速为 16.5 m/s,因此导流洞出口可以不设置消能设施。

3 放空洞水力特性

3.1 各体型对比

体型 1 连接段为渥奇曲线,实测连接段的 2 个掺气坎空腔很稳定。但是该体型的不足之处是导流洞出口流速达 37 m/s,需要在出口处设置消能设施。

表 4 竖井泄洪洞消能率

工 况	2-2 断面 流速 v_2 /(m·s ⁻¹)	3-3 断面 流速 v_3 /(m·s ⁻¹)	1-1 断面 能量 E_1 /m	2-2 断面 能量 E_2 /m	3-3 断面 能量 E_3 /m	消能率 η /%	
						2-2 断面	3-3 断面
工况 2	14.36	11.86	157.39	18.52	10.13	88.20	93.60
工况 3	17.75	15.36	159.76	24.08	15.23	84.90	90.50
工况 4	21.17	16.49	160.68	30.87	17.08	80.80	89.40

表 5 为曲线段空化数,最小空化数为 0.25。曲线段有 -11.00 kPa 左右的负压,反弧段最大压强为 73.21 kPa。

表 5 体型 1 曲线段空化数(工况 3)

高程	水深/m	压强/kPa	空化数 σ_i
236.05	2.03	1.76	0.25
253.69	2.28	-7.84	0.27
270.88	2.46	2.25	0.37
287.73	2.24	-11.07	0.25
293.34	2.10	9.60	0.32
300.67	2.00	72.81	0.48
306.79	1.94	73.21	0.45

体型 2 连接段为水平等高阶梯。该体型的缺点是:在大流量下前几个阶梯会脱离底板,阶梯利用率低,并且阶梯上水翅很高,影响范围大,进入导流洞时由于没有反弧连接,水流对底板冲击压力大,导流洞两边墙有很高的水翅,接近直墙高度。

体型 3 对阶梯的布置做了调整,试验发现其流态得到了显著的改善,只在流量为 50~150 m³/s 时存在较小的水翅,且影响范围小。阶梯前的突扩突跌掺气设施使水舌在 4 个面上都与空气接触,实测底空腔长度在 6~14 m 范围,掺气效果很好。

体型 4 将连接段宽度增大到 4.5 m,同时阶梯后增加了长度为 50 m 的消力池。由于单宽流量减小,因此水流在阶梯段掺气效果和消能率都得到了提高。但是该体型也存在一定的不足,消力池增加了工程量,并且连接段有一定的水翅。

3.2 阶梯面压强特性

体型 3 第 24 号阶梯的压强特性如图 5 所示,其压强分布规律与文献 15 和文献 20 相似。在水平面上时均压强呈“ $\sim$ ”分布,在距离凹角 0.3l~0.4l 处有个低压区,流量越大,压强越小,在距离凹角 0.7l~0.9l 处有个高压区,流量越大,压强越大,在水平面上的脉动压强均方根 σ 是逐渐增加的,在距离凹角 0.8l 附近有个最大值 40.50 kPa。在竖直面上,时均压强从下往上逐渐减小,0.6h 以上会有一定的负压,而脉动压强均方根 σ 则是在中部较小,上部和下部较大。由于在竖直面上布置的测点较少,压强的分布规律不太明显,以后还须做进一步研究。

3.3 阶梯消能率

放空洞连接段的消能率按式(4)计算,各计算断

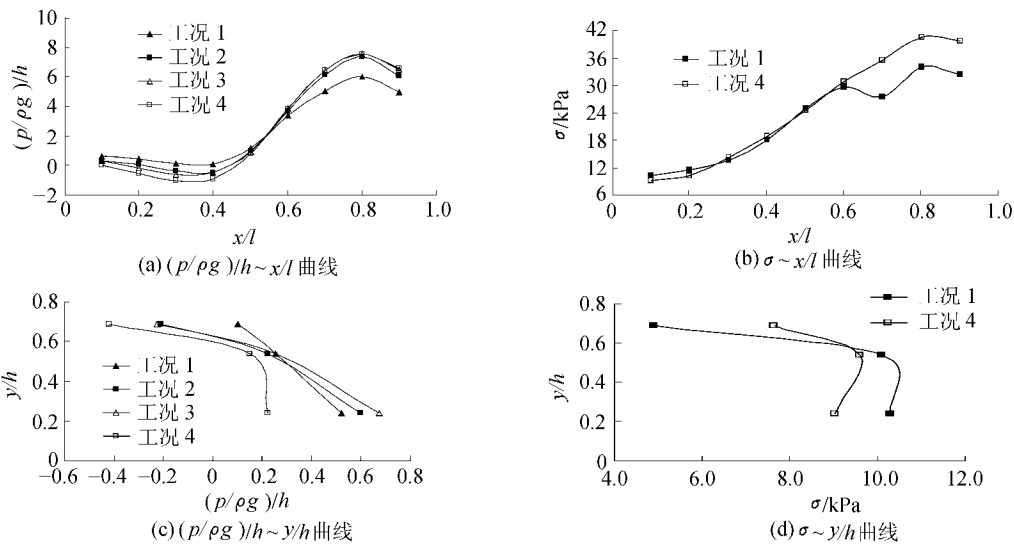


图 5 24 号阶梯压强分布
表 6 各体型断面流速及消能率

体型	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	2-2 断面流速 $v_2/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3-3 断面流速 $v_3/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	4-4 断面流速 $v_4/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1-1 断面能量 E_1/m	消能率 $\eta/\%$		
						2-2 断面	3-3 断面	4-4 断面
体型 3	100	20.56	15.48	12.97	48.56	44.7	67.90	79.30
	150	24.68	19.30	15.37	64.89	43.3	65.40	79.10
	190	28.41	23.86	18.31	82.65	42.9	60.30	77.30
体型 4	100		7.89	8.16	48.56		85.00	88.70
	150		8.71	9.00	64.89		86.70	89.30
	190		9.63	10.01	82.65		88.10	90.30

面如图3所示,各体型断面流速及消能率计算结果如表6所示。由表6可知,体型3在阶梯段消能率为42%~45%,单宽流量越小,消能率越高;导流洞出口最大流速为18.31 m/s。体型4消能效果更明显,随着流量的增加消能率有所提高,消力池后水流平均流速小于10 m/s,阶梯和消力池总消能率为88%~90%。

经过对各体型水力特性的分析可知,体型3结构简单,水流流态很好,消能率较高,可以有效地改善枢纽布置,减小工程量。体型3为试验的推荐体型。

4 结 论

该水电站采用放空洞、旋流竖井泄洪洞与导流洞‘三洞合一’的布置形式,有效地利用了原导流洞,降低了枢纽布置难度。旋流竖井泄洪洞各部位结构合理,涡室中的导流坎能够改善流态,泄洪洞泄流能力与消能率满足设计要求,消能率在80%以上,导流洞出口最大流速在16.5 m/s左右,可不设置其他消能设施。

放空洞连接段采用阶梯连接有利于减小导流洞出口流速,减小施工难度和工程量。优化体型采用前置掺气坎+斜面阶梯+水平阶梯相结合的曲线型阶梯消能工,有效地改善了连接段的水流流态,提高

了阶梯底部及边墙掺气浓度,减小了发生空化空蚀的可能性。由于模型尺寸的局限性,今后还需要增大模型尺寸,对曲线型阶梯消能工细部结构进行相关研究。

参考文献:

- [1] DRIOLI C. Esperienze su installazioni con pozzo di scarico a vortice(experimental data on use of vortex spillway shafts) [J]. Energia Elettrica ,1969 46(6) 399-409.
- [2] LLYUSHIN V F ,GIL 'FANOVA V A. Tunnel spilling for a high-head dam [J]. Izdatel ' stvo Meditsina , Russia : Gidrotekhnicheskoe Stroitel 'stvo ,1993(2) 21-24.
- [3] JAIN S C. Tangential vortex-inlet [J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,1984 ,110(12) :1693-1699.
- [4] 董兴林,郭军,杨开林,等.高水头大流量泄洪洞内消能工研究进展 [J]. 中国水利水电科学研究院学报 ,2003 (3) :185-189.
- [5] 邵敬东.旋流式竖井泄洪洞在沙牌工程中的应用 [J]. 水电站设计 ,2003 ,19(4) 61-64.
- [6] 牛争鸣,洪锦,谢小平,等.导流洞改建为旋流式内消能泄洪洞的研究和实践——以公伯峡水电站为例 [J]. 水利水电科技进展 ,2007 27(1) 36-41.
- [7] 董兴林,高季章,鲁慎悟,等.导流洞改为旋涡式竖井溢洪道综合研究 [J]. 水力发电 ,1995(3) 32-37.
- [8] 董兴林,高季章,钟永江.超临界流旋涡竖井式溢洪道设计研究 [J]. 水力发电 ,1996(1) 44-48.

[9] 郭炎,倪汉根.旋流竖井溢洪道的水流特性研究[J].水动力学研究与进展,1995,10(2):146-154.

[10] 董兴林,郭军,肖白云,等.高水头大泄量旋涡竖井式泄洪洞的设计研究[J].水利学报,2000(11):27-31.

[11] 刘善均,许唯临,王韦.高坝竖井泄洪洞、龙抬头放空洞与导流洞‘三洞合一’优化布置研究[J].四川大学学报:工程科学版,2003,35(2):10-14.

[12] 高鹏,杨永全,马耀,等.旋流式竖井涡室结构优化试验研究[J].人民长江,2006,31(11):121-123.

[13] 刘超,张光科,冯凌霄,等.泄洪洞反弧段上游掺气坎对反弧段下游侧墙的减蚀作用[J].水利水电科技进展,2007,27(1):46-49.

[14] 方卫红,孙保平.旋流消能及三洞合一出口型式在溪古水电站设计中的应用[J].西北水电,2007(4):25-33.

[15] MARTI S J. Pressure on a stepped spillway[J]. Journal of Hydraulic Research,2007,45(4):505-511.

[16] CHANSON H, GONZALEZ C A. Physical modeling and scale effects of air-water flows on stepped spillways[J]. Journal of Zhejiang University : Science,2005,6(3):243-250.

[17] PFISTER M, HAGER W. Stepped chutes :pre-aeration and spray reduction[J]. International Journal of Multiphase Flow,2006,32(2):269-284.

[18] STEPHENSON D. Energy dissipation down stepped spillways [J]. Intl Water Power and Dam Construction,1991,43(9):27-30.

[19] 吴守荣,张建民,许唯临,等.前置掺气坎式阶梯溢洪道体型布置优化试验研究[J].四川大学学报:工程科学版,2008,40(3):37-42.

[20] 张志昌,曾东洋,郝阿漫,等.台阶式溢洪道滑流水流压强特性的试验研究[J].水动力学研究与进展:A辑,2003,18(5):652-659.

[21] 张志昌,曾东洋,刘亚菲.台阶式溢洪道掺气特性的试验研究[J].应用力学学报,2003,20(4):97-100.

[22] 陈群,戴光清,朱分清,等.影响阶梯溢洪坝消能率的因素[J].水力发电学报,2003,83(4):95-104.

[23] 郭军,刘之平,刘继广,等.大朝山水电站宽尾墩阶梯式坝面泄洪水力学原型观测[J].云南水力发电,2002,18(4):16-20.

(收稿日期:2008-12-03 编辑:方宇彤)

+++++

(上接第 36 页)

参考文献:

[1] 顾晓鲁,钱鸿缙,刘惠珊,等.地基与基础[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.

[2] JEONG S, LEE J, LEE C J. Slip effect at the pile-soil interface on dragload[J]. Computers and Geotechnics,2004,31:115-126.

[3] COMODROMOS E M, BAREKA S V. Evaluation of negative skin friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis[J]. Computers and Geotechnics,2005,32:210-221.

[4] 刘汉龙,张晓健.负摩擦作用下 PCC 桩沉降计算[J].岩土力学,2007,28(7):1483-1486.

[5] 高绍武,王建华,毛娜.层状地基中单桩负摩擦问题积分方程解法[J].岩土力学,2005,26(9):1456-1460.

[6] TAKAHASHI K. Bending of a batter pile due to ground settlement[J]. Soils and Foundations,1985,25(4):75-91.

[7] SHIBATA T, SEKIGUCHI H, YUKITOMO H. Model test and analysis of negative friction acting on piles[J]. Soils and Foundations,1982,22(2):29-39.

[8] RAO S N, MURTHY T V B S S, VEERESH C. Induced bending moments in batter piles in settling soils[J]. Soils and Foundations,1994,34(1):127-133.

[9] ZHAO Hui-yang, JEREMIC B. Numerical analysis of pile behaviour under lateral loads in layered elastic-plastic soils [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2002,26:1385-1406.

[10] GEORGIADIS M, ANAGNOSTOPOULOS C, SAFIEKOU S. Cyclic lateral loading of piles in soft clay[J]. Geotechnical Engineering,1992,23:47-60.

(收稿日期:2009-02-20 编辑:高建群)

+++++

(上接第 45 页)

[11] 张兴芳.城市需水量预测方法的研究[J].太原理工大学学报,2000,31(3):159-161.

[12] 王景,刘良栋,王作义.组合预测方法的现状和发展[J].预测,1997,16(6):37-38.

[13] 唐纪,王景.组合预测方法评述[J].预测,1999,18(2):42-43.

[14] ZHANG G P. Time series forecasting using a hybrid ARMA and neural network mode[J]. Neurocomputing,2003,50:159-175.

[15] TANG Xiao-wo, ZHOU Zong-fang, SHI Yong. The error bounds of combined forecasting [J]. Mathematical and Computer Modelling,2002,36(9):997-1005.

[16] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000.

[17] 邓红霞,李存军,赵太想,等.基于 SPA 的水文预测模型评估[J].四川大学学报:工程科学版,2006,38(6):34-37.

[18] 曾珍香,谢素卿.常用预测方法的模糊综合评判模型[J].预测,1993,12(4):60-64.

[19] 金菊良,洪天求,王文圣.基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J].水力发电学报,2007,26(4):22-28.

[20] 王应明,傅国伟.基于不同误差准则和范数的组合预测方法研究[J].控制与决策,1994,9(1):20-28.

[21] 陈守煜.水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M].大连:大连理工大学出版社,2005.

[22] 张雅君,刘全胜.需水量预测方法的评析与择优[J].中国给水排水,2001,17(7):27-29.

(收稿日期:2008-10-31 编辑:高建群)