

多级连续消力池水跃的水力特性模型试验

王 胜^{1,2}, 李连侠², 孙 炯¹, 刘 学¹, 廖华胜², 沈焕荣², 易文敏²

(1. 中国水电建设集团圣达水电有限公司 四川 成都 610041 ;

2. 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)

摘要 :以低弗劳德数、大单宽流量的安谷水电站为例 ,对不同方式形成多级水跃的消力池进行了系列水工模型试验 ,研究了不同方案形成的多级水跃的水力学特性。试验结果表明 :采用多排消力墩方式形成多级消力池 ,其消能率虽有保证 ,但消力墩布置形式对池内流态影响较大 ,对不同单宽流量工况适应性不好 ,特别是单宽流量大时难以形成多级水跃 ;采用圆弧进口连续坎式消力池大幅度改善了流态 ,但仍未能形成两级水跃 ;采用跌坎进口连续坎式形式的两级浅水垫消力池 ,在很大流量范围内均形成明显的两级水跃流态 ,消能效果理想 ,池内临底流速和出池流速均比其他方案低 ,结合下游的反坡护坦 ,间接抬高了下游水位 ,使得出池水流平顺 ,且结构简单 ,施工方便。

关键词 :多级水跃 ;消力池 ;消力墩 ;消能 ;安谷水电站

中图分类号 :TV135.2⁺1 ;TV131.61 **文献标志码** :A **文章编号** :1006-7647(2012)04-0023-06

An experimental study on characteristics of hydraulic jumps in multiple continuous stilling basins//WANG Sheng^{1,2}, LI Lian-xia², SUN Jiong¹, LIU Xue¹, LIAO Hua-sheng², SHEN Huan-rong², YI Wen-min²(1. Sinohydro Shengda Hydropower Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract : In this study, the characteristics of hydraulic jumps in three types of multiple stilling basins were experimentally investigated, taking the Angu hydropower project as an example. The experimental results indicate that : when a multiple stilling basin formed by baffle blocks is used, although its energy dissipation ratio is satisfactory, the multiple hydraulic jumps cannot be formed with a large unit width discharge ; although the flow pattern can be greatly improved when an abrupt drop and a continuous bucket at the beginning and middle of the basin were adopted to replace the conjunction and the baffle blocks respectively, the double hydraulic jumps still cannot be formed ; and two apparent and favorable hydraulic jumps can be formed within a large discharge range in a new multiple stilling basin with two shallow cushions. The velocities near the bottom and the outlet velocities with the new basin were found to be smaller than those with other types of the multiple stilling basins. Combined with the downstream reverse sloping apron, the new basin can raise the downstream water level and smooth the flow pattern. The structure of the new basin is simple and can be easily constructed.

Key words : multiple hydraulic jumps ; stilling basin ; baffle block ; energy dissipation ; Angu hydropower station

底流消能是利用消力池使下泄水流在泄水建筑物出口限定范围内产生水跃 ,将上下游水流衔接 ,并通过水跃产生表面旋滚和强烈的紊动以达到消能的目的^[1-2]。水跃的流态与跃前弗劳德数和下游尾水有直接的关系^[3] ,为在不同来流和下游尾水条件下在消力池内形成稳定水跃 ,通常采用不同于传统消力池的体型^[4] ,如进口设置跌坎 ,采用突扩突跌 ,末端设置尾坎等。为减少工程造价和提高消能率 ,应

尽可能缩短消力池的长度 ,并在池内设置辅助消能工^[5-9] ,进一步加剧水流的紊动混掺作用 ,目前国内主要采用趾墩、消能墩、T 型尾墩、尾坎等形式。底流消能工消力池的长度选择及池内加设辅助消能工的形式 ,应慎重考虑 ,应对各级流量进行水力计算。根据文献 [2] 介绍 ,池内设趾墩或消力墩 ,其池内流速不宜大于 18 m/s ,否则会造成空蚀破坏。

在实际工程中 ,往往需要消力池能够在不同的

基金项目 :国家自然科学基金(51079091)

作者简介 :王胜(1969—)男 ,黑龙江佳木斯人 ,高级工程师 ,主要从事水电工程建设管理工作。E-mail :wangsheng0451@sina.com

通讯作者 :李连侠(1978—)男 ,河南南阳人 ,副研究员 ,博士 ,主要从事工程水力学和地下水数值模拟研究。E-mail :lianxiali@scu.edu.cn

来流和下游水深条件下均能形成较好的水跃^[3],采用多级水跃消能方式则能够较好地解决这一问题^[10-12],其关键技术在于通过何种方式形成多级水跃来适应不同的洪水工况。本文以待建的安谷水电站为例,对旨在形成多级水跃的消力池内辅助消能工进行了系列水工模型试验,结合不同的护坦形式,对比了3种底流消能工体型的水力特性,提出了一种合理的消能防冲体型及布置形式。

安谷水电站工程开发任务为发电和航运,并兼有防洪、灌溉、供水等功能。工程坝址处河道顺直,河谷开阔,水流散乱,洲岛遍布,是典型的多汉滩险河道。安谷水电站挡水建筑物为闸坝,水库调蓄能力差,遇洪水时大排大泄,绝大部分悬移质细颗粒泥沙将通过闸坝排往下游。工程采用混合式开发方式,水库正常蓄水位为398.0 m,电站装机容量为760 MW,满发流量为2 576 m³/s,当流量大于4 500 m³/s时停止发电,13孔闸门全开泄洪;电站下游消能防冲标准为50年一遇洪水,校核洪水按2 000年一遇标准设计。安谷水电站主要泄水建筑物为布置于河床中部的13孔泄洪和冲沙闸,其中紧靠电站厂房5孔为冲沙闸,其余8孔为泄洪闸,泄洪闸和冲沙闸采用相同结构布置,均为开敞式平底堰,单孔净宽12.0 m,底板高程383.0 m,闸墩顶高程400.7 m,闸室净高21.7 m,闸室顺水流方向长44.0 m,采用弧形工作门,工作门后底板采用1:4的斜坡接反弧段(半径30 m)与消力池相接。为安全高效地消除下泄余能,有效地保护下游建筑物,同时保证河道行洪能力和河岸安全,安谷水电站需要设置合理的消能措施。

1 消力墩式多级消力池的水力特性

安谷水电站泄洪消能的原设计方案采用消力墩式多级消力池消能(以下简称方案1),其体型布置如图1所示。其中,工作闸后闸室底板以1:4的斜坡与消力池相接,两者以半径为30 m的反弧段过渡。第1级消力池底板顶高程369.0 m,池长32.81 m,池内布置2排消力墩及1排差动式消力坎,消力墩顶高程均为374.0 m,墩高5 m,差动坎高3.75~5.00 m,坎后以1:2的斜坡与第2级消力池相接;第2级消力池底板高程369.5 m,池长73.50 m,池末端设差动坎,坎高2.75~4.50 m,坎后以1:2的斜坡与海漫连接,至桩号0+239.0处,再以1:4反坡连接至桩号0+251.0处,高程为374.5 m,后接水平海漫,长为102 m,海漫总长度为164 m。闸室出口下游消力池内顺水流方向布置有2道导流墙。

针对方案1,首先进行模型比尺为1:70的整体水工模型试验,模型按重力相似准则设计,模型枢纽

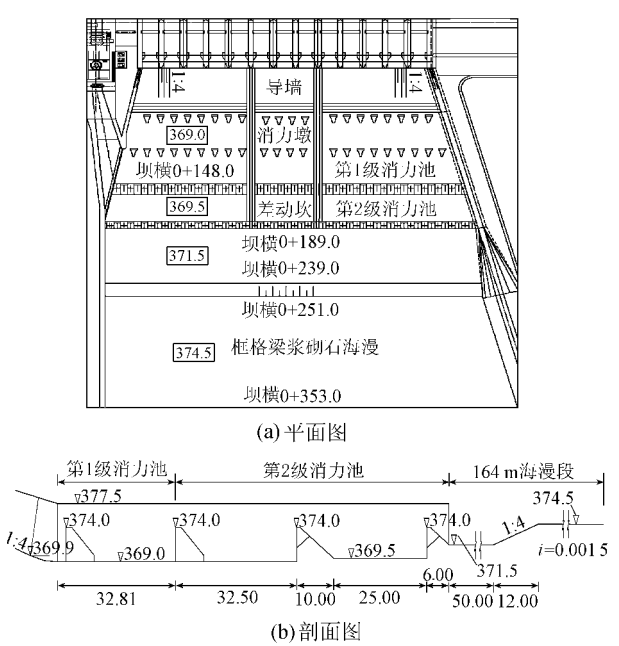


图1 方案1各级消力池结构布置(单位:m)
布置形式见图2。试验流量范围较大,从1924 m³/s变化到2 000年一遇校核洪水的14 000 m³/s,消力池进口处弗劳德数较小,单宽流量较大,具体工况参数见表1。

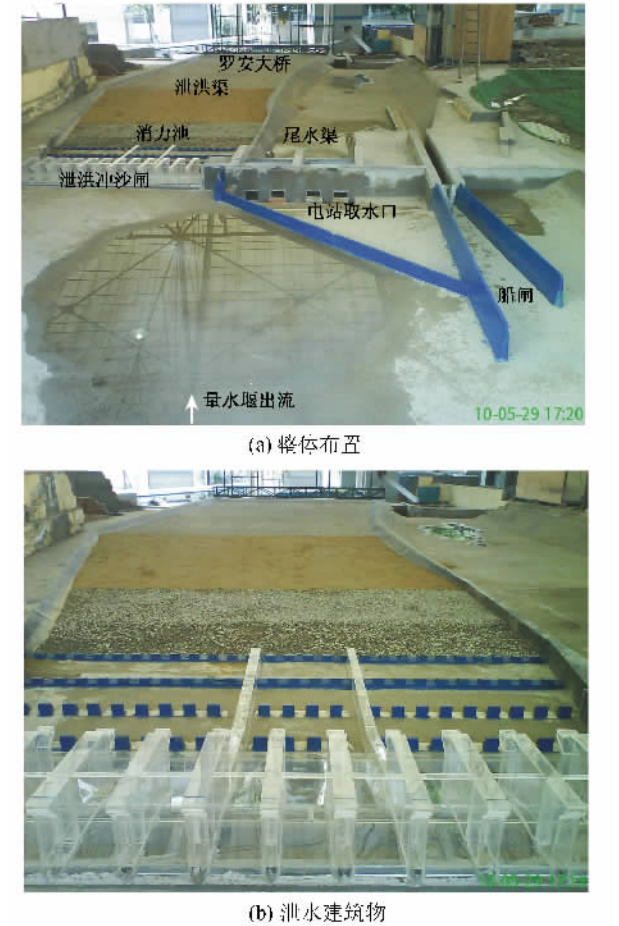


图2 整体水工模型试验枢纽布置
为了更好地研究下游消能冲刷特性,海漫按抗冲流速为6~7 m/s考虑,模型用天然石子进行模拟,

表 1 试验工况

工况	洪水频率/%	下泄流量/(m ³ ·s ⁻¹)	库水位/m	下游水位/m	单宽流量/((m ³ ·s ⁻¹)·m ⁻¹)	消力池进口处弗劳德数
1	0.05	14000	397.05	381.35	89.74	2.64
2	2	10000	394.27	380.50	64.10	2.67
3	10	8090	392.79	378.65	51.86	2.92
4	20	4500	390.00	376.90	125.00	2.52
5	20	4500	390.00	376.10	28.85	3.28

注:工况 1 为校核洪水;工况 2 为下游消能防冲标准洪水;工况 4 为不发电、右边 3 孔均匀开启泄洪工况;工况 5 为发电工况。

相应的模型粒径范围为 0.5~1.5 cm(铺设厚度为 1.5~2.0 cm)。覆盖层用天然河沙模拟至坝 0+703.0 止,原型河床质颗粒级配见表 2。为了方便测量水边线,泄洪渠右边墙顶高程在坝 0+420.0 之前模拟高程为 385.0 m,之后及左边墙顶高程为 381.5 m。动床模拟覆盖层底高程至 365.0 m,模拟范围为护坦末端至坝 0+703.0 处,试验结果为冲刷稳定后实测结果。

表 2 安谷水电站河床质颗粒级配

粒径 D/mm	<0.1	<0.5	<1	<2	<5
小于某粒径土的质量分数/%	3.40	4.50	6.41	7.77	12.70
粒径 D/mm	<10	<20	<60	<100	<200
小于某粒径土的质量分数/%	18.00	29.80	55.10	72.70	100

流态观测结果(图 3)显示,各工况下第 1 级消力池内水跃均十分明显,紊动强烈,跃首在反弧段以上,流量较小工况下,消能水体基本位于第 1 排消能墩之上,流量较大工况下,消能水体逐渐向后扩大,但主要消能任务仍由第 1 级消力池承担。10 年一遇及以下频率工况下,由于第 1 级消力池消能充分,左岸护坦扩散段可见回流,海漫段水面平滑,与下游水面衔接良好,随着流量的增大,海漫段水面起伏趋于明显,特别是流量超过 10000 m³/s 后,消力池内泄洪渠中部水面波动较大,出池水流跌落也较大,海漫段水面涌波持续范围较远。当闸孔局部开启时,闸后第 1 排消力墩处水流流态较乱,水流直接顶冲消力墩,冲高较大,时见水流越过右边墙现象。

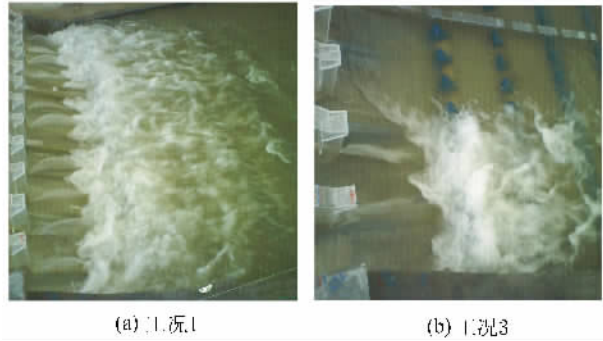


图 3 方案 1 典型洪水工况下各部位水流流态

4 级消力墩或差动坎中,第 1 排消力墩起到主要的消能作用,其消能方式主要是水跃和水流与消力墩的碰撞,后 3 排消力墩(坎)除起壅高水垫作用外几乎没有起到更多的消能作用。在正常蓄水位电站发电、冲沙泄洪闸下泄多余水量这种常见工况下,坝下水流流速达到 18~20 m/s(图 4),单孔下泄量越大,水流对第 1 级消力墩的冲击力越强,碰撞跃起的水浪高程在 383.0 m 以上,超过了右边墙顶高程,同时碰撞会引起频繁的振动,对消力墩及整个消力池(坐落在约 10 m 深的覆盖层上)的稳定性极为不利,应对该方案进行优化修改。

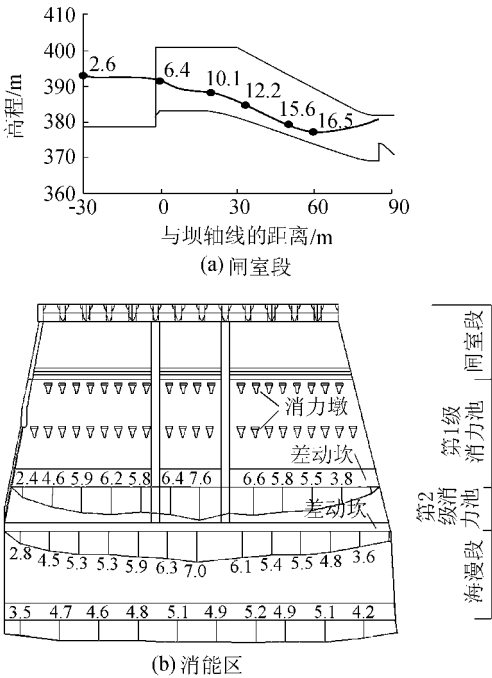


图 4 方案 1 工况 2 闸室段及消能区流速分布(单位:m/s)

各工况下从海漫尾部开始,沿程均有不同程度的冲刷,消力池末端与海漫前端之间河床中部形成了 2 个冲刷坑,冲刷深度和范围随流量增加而增大;工况 2 海漫段末端下游 50 m 范围内,冲刷深度在 2.3~3.6 m 之间(图 5);工况 1 冲坑最深点约在海漫末端 50 m 处,深度达 5.9 m。

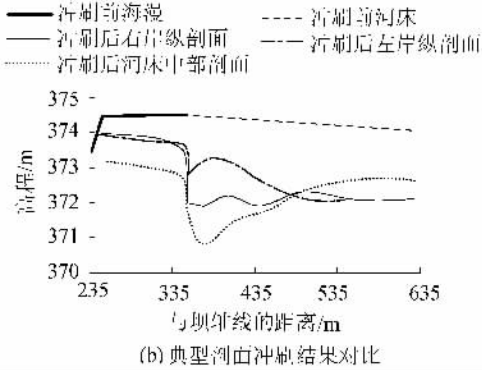
方案 1 最大的问题在于流态不稳定,适应流量范围小,效能布局不合理,多级消力池仅发生一次水跃,且主要靠坝后高速水流与第 1 排消力墩的碰撞消能,严重危及消力墩的稳定性。

2 圆弧进口连续坎式多级消力池的水力特性

对消力墩式多级消力池体型及海漫布置形式做了如下改变:①取消了第 1 排消力墩和消力池内的 2 条分水墙;②第 4 排差动坎(图 6 虚线圆圈部分)消能率很小,但是考虑到右侧冲沙孔运行开启的频率较高,所以只保留了右边一半,左边部分取消后以



(a) 冲坑形态



(b) 典型剖面冲刷结果对比

图5 方案1工况2冲坑试验结果

1:4的反坡与海漫直线连接;③海漫前部采用1:10的反坡设计,海漫总长度缩短了84m,后端增设28m长的防冲槽(底高程为371.5m),槽内用大石回填。该方案为圆弧进口连续坎式多级消力池方案(以下简称方案2),其体型尺寸和布置形式见图6。

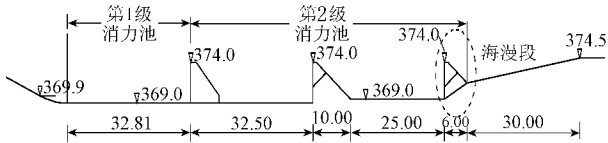


图6 方案2各级消力池结构布置(单位:m)

流态观测结果(图7)表明,在各级流量工况下取消了第1排消力墩后,水跃消能效果良好,大幅度增大了消能水体,水跃主要发生在原第2排消力墩之前;由于方案2在池内未设置分水墙,水流平顺,波动比方案1小,特别是横向分布较为均匀;由于差动坎后海漫的反坡设计,使得坎后水面很平静,没有明显水面跌落现象;河床与防冲槽连接处有一定水面波动,其后水面与下游水位光滑衔接。在正常蓄水位泄洪冲沙闸局部开启泄洪工况下,方案2中消



(a) 工况1

(b) 工况3

图7 方案2典型洪水工况下各部位水流流态

力池内的水跃消能良好,横向均化作用明显,不会出现方案1中的水流与第1排消力墩严重碰撞的现象,大幅度减轻了水流对消力墩的强烈冲击作用,有利于软基上的建筑物安全。

在各级流量工况下,各个断面的流速横向分布较为均匀(图8(a)),充分发挥了宽河床的均化作用。在工况2下,方案1中最大出池流速为7.0m/s,而在方案2相应的最大出池流速只有6.0m/s左右,且主流在表面。虽然缺少了方案1中第1排消力墩的碰撞消能,但方案2的水跃消能水体更大,消能率与方案1相应各个工况下消能率基本相当,以水跃为主的底流消能方式更安全合理。

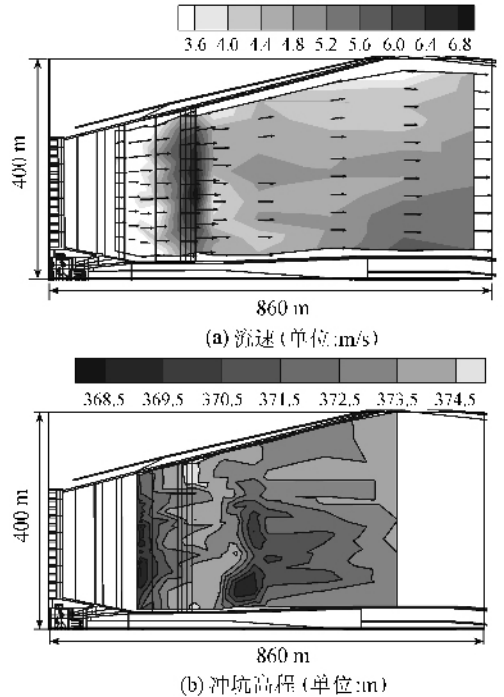


图8 方案2工况2流速及冲坑试验结果

由于水跃的消能作用,整个流场的横向分布均匀,再加上海漫段的优化设计,使得海漫上水面跌落较小,在各级50年一遇以下频率洪水工况下,海漫的破坏不明显,河床冲刷明显减轻和均化了。在50年一遇洪水工况下,大石回填段的破坏也不明显(图8(b)),在海漫末端50m处冲刷深度有一极大值为2.3m,不会威胁海漫的安全;而方案1冲坑相对较深区距离海漫段末端很近,在其后30m范围内形成很大的淘刷坑,最大冲刷深度3.6m,相应的冲刷高程为370.9m,海漫段末端安全无法保证。工况1下,方案2冲坑最深点高程为370.7m(冲刷深度3.7m)发生在海漫末端下游约150m处,方案1冲坑最深点高程为368.5m,距离海漫末端仅50m左右。方案2冲刷深处离海漫末端较远,深度也不深,对海漫的安全更有利。

综上所述,方案2与方案1相比,水跃流态良好,解决了中间流速集中现象,海漫前段采用反坡设计,后段采用防冲槽回填大石方式,对海漫的安全保护作用明显,冲坑比较均匀,冲刷程度大幅度减轻,特别是消能防冲洪水标准及以下工况下,消力池差动尾坎后海漫前端未见明显冲刷现象,缩短了海漫长度,其后冲刷最深处反而离海漫末端更远,对消能设施更有利,但方案2也未能实现多级消力池多级水跃的目的,只有第1级消力池承担了消能任务,消能布局仍不合理。

3 跌坎进口连续坎式多级浅水垫消力池的水力特性

前述试验结果表明:①不管是消力墩方案,还是圆弧进口连续坎方案,消能任务均主要在消力池第1排消力墩之前完成,未能充分发挥后面几排辅助消能工的多级消能作用。②采用消力墩作为消能设施,对各级流量的适应性较弱。正常发电运行宣泄多余流量工况下,部分主流从各墩之间的间隙处流向下,该部分水流未能充分参与消能,在流量超过 $8090\text{ m}^3/\text{s}$ 的敞泄工况下,主流从面上飘过,导致消力墩对水流的消能作用也不佳(与粗糙表面对水流影响相类似);再加上施工难度较大,自身安全性有一定问题,因此应尽量减少或不用消力墩。③从消能防冲的工程经验可知,消力池及海漫破坏较大的两种重要工况在于“一头一尾”:一是正常蓄水位电站发电运行、泄洪冲沙闸局部开启泄流工况,这种工况流量虽然不大,但动能比较大,而泄洪渠和电站尾水渠相对独立,泄洪冲沙闸下游消力池水垫深度较浅,开启闸门泄洪时,可能对下游冲刷破坏比较严重;二是消能防冲设计洪水标准(50年一遇洪水)及以上工况下,下泄水流整体能量较大,再加上安谷水电站地处大渡河下游,河床颗粒偏细,抗冲能力较低,对下游的破坏力较大。④海漫前段采用反坡设计、后段采用防冲槽回填大石方式,合理可行。

根据上述分析,结合多次体型修改及流态观察,并考虑到跌坎式消力池在类似条件下的良好水力特性^[8-9,43],对消力池体型和海漫形式进行了如下修改:①消力池与闸室连接方式改为跌坎,在桩号 $0+67.0$ 处;②消力池末端桩号位置从前两个方案的 $0+189.0$ 提前至 $0+158.0$,护坦段缩短了 31 m ,两级消力池总长度从 106.3 m 缩短至 91.0 m ;③将方案2中的消力墩改为一道连续坎(位置从 $0+115.5$ 提前至 $0+105.0$),保留了方案2的前排差动坎,其后即为海漫(取消了方案2的最后一级差动尾坎);④海漫起点向前移至 $0+158.0$,前段仍采用反坡设计,坡

度为 $1:12$,海漫平段高程降至 374.0 m ,降低了 0.5 m ,海漫末端桩号为 $0+269.0$ 。该方案为跌坎进口连续坎方案(以下简称方案3),其体型见图9。

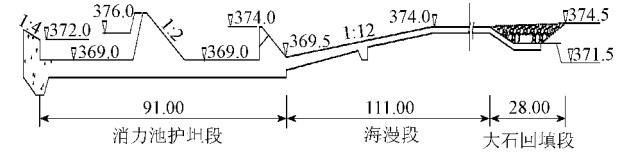


图9 方案3各级消力池结构布置(单位:m)

在各级流量工况下,方案3的2个浅水垫消力池内均形成了稳定的水跃,两级消能流态非常明显(图10),消能效果良好,出池流态比方案1和方案2有明显改善;消力池内临底流速和出池流速(尾坎后)均比方案1和方案2低,且横向分布更均匀,见图11(图中横距表示距离第1孔冲沙闸右边墙横向长度)。不同流量工况下3种消力池各级消能率对比情况见表3,可见各工况下3个方案的消能率大致相当,均在50%以上(为方便对比,入口断面取坝轴线断面,基准高程取差动坎后海漫起点高程 371.5 m),但方案1和方案2的消能任务主要在桩号 $0+140.0$ 之前完成,后面2排差动坎除壅高水垫以

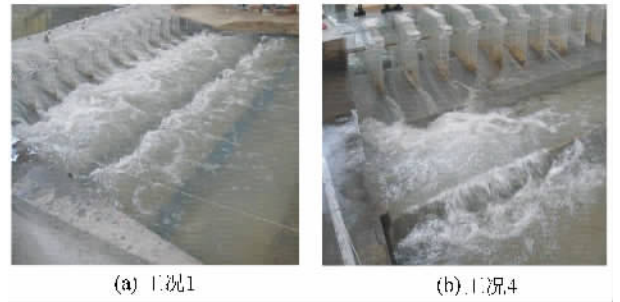


图10 方案3典型洪水工况下各部位水流流态

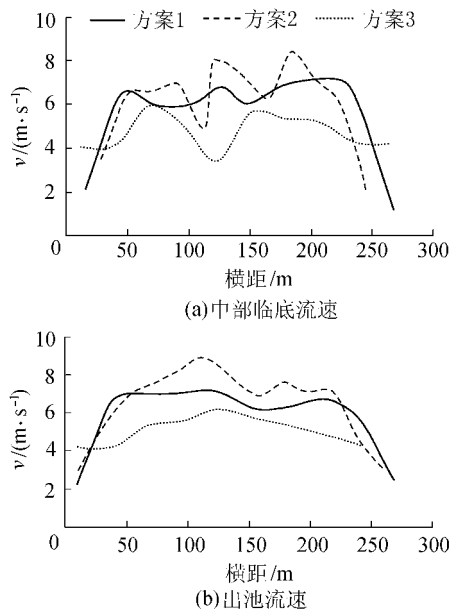


图11 3种方案工况1消力池典型位置流速分布对比

外,消能率未超过 1.5%,基本没有起到更多的消能作用,只有方案 3 真正实现了多级消能的目的,第 1 级水跃消能率消耗了大部分能量,第 2 级水跃消能率达 9.80%~14.63%,所以,从消能率可以看出,方案 3 充分发挥了各个消能工的消能作用,两级消能作用明显,消能布局更合理。

流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)		方案	消能率/%	
			第 1 级消力池	第 2 级消力池
4 500	1		57.4	0.8
	2		56.3	1.2
	3		48.1	10.1
8 090	1		53.3	1.9
	2		52.9	0.2
	3		41.7	13.7
10 000	1		52.0	1.6
	2		51.7	0.6
	3		39.3	13.6
14 000	1		49.7	3.5
	2		50.2	0.5
	3		36.2	14.6

冲坑试验结果表明,方案 3 下游整体冲刷情况要优于方案 1 和方案 2(图 12),工况 4 及以下洪水工况,海漫及末端与河床连接处均未出现明显冲刷现象,工况 2 和工况 3 大石回填段略有冲刷,冲刷深度基本在 1 m 以内,下游河床右岸冲刷深度最大约 1.8 m(冲刷高程 372.6 m,桩号 0+398.0),右岸冲刷比左岸明显要深,方案 3 在右岸的冲刷深度要比方案 2(海漫后 50 m 范围内右岸最大冲刷深度约为 2.2 m)要小;工况 1 下,海漫后 50 m 范围内最大冲刷深度在 2 m 左右。

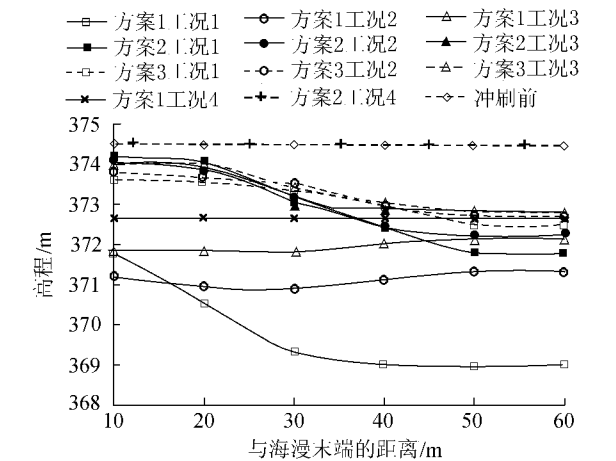


图 12 不同流量下 3 种方案海漫后冲刷情况对比

4 结 论

以低弗劳德数、大单宽流量的安谷水电站为例,

通过系列试验对比了 3 种形式的多级消力池水力特性。研究表明,采用多排消力墩方式形成多级消力池消能率虽有保证,但消力墩布置形式对池内流态影响较大,对不同单宽流量工况适应性不好,特别是单宽流量大时难以形成多级水跃,且自身稳定性难以得到保证;采用圆弧进口连续坎式消力池大幅度改善了流态,但仍未能形成两级水跃;采用跌坎进口连续坎式形式的两级浅水垫消力池,结合下游的反坡护坦形式,池内能形成明显的两级水跃,消能效果理想,且对各种工况的适应能力非常强,具有流态稳定、临底流速低、消能率高、出池水流平稳及施工简单等优点,是解决低弗劳德数、大单宽泄水建筑物(特别是软基上)下游消能防冲技术难题的一种有效方式。

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] CHANSON H. Current knowledge in hydraulic jumps and
related phenomena[J]. European Journal of Mechanics B:
Fluids, 2009, 28(2):191-210.

[3] YAUSDA Y, TAKAHASHI M, OHTSU I. Discussion on
tailwater level effects on flow conditions at an abrupt drop[J].
Journal of Hydraulic Research, 2005, 43(2):217-224.

[4] 刘沛清,冬俊瑞.消力池及辅助消能工设计的探讨[J].
水利学报,1996(6):48-56.

[5] 孙双科,柳海涛,夏庆福,等.跌坎型底流消力池的水力
特性与优化研究[J].水利学报,2005,36(10):1-7.

[6] ZARE H K, DOERING J C. Forced hydraulic jumps below
abrupt expansion[J]. J Hydraulic Eng, 2011, 137: 825-835.

[7] 江锋,苗隆德,王飞虎,等.低佛氏数 T 形墩消力池设计
及消能研究[J].水利学报,1998(增刊 1):133-138.

[8] 苏沛兰,廖华胜,李天翔,等.浅水垫消力池水力特性研
究[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(2):35-41.

[9] 禚勇伸,廖华胜,李连侠,等.浅水垫消力池的数值模拟
与实验研究[J].水力发电学报,2010,29(2):36-41.

[10] ANWAR N, EDIJATN O, DERMAWAN V. Characteristics of
the hydraulic jump on serial drop[J]. International Journal of
Academic Research: Part III, 2011, 3(1):732-736.

[11] 马淑珠,宋怀兴.多级坎式消能池的水力设计[J].东北
水利水电,1996(2):15-18.

[12] 吴子荣,包中进.多级消力池水力特性的研究及应用
[J].水利水电技术,1998,29(12):17-19.

[13] 蒋胜银.双浅水垫消力池模型试验研究[J].陕西水利,
2011(2):67-68.

(收稿日期 2011-12-15 编辑 熊水斌)