

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2015.03.16

$$\frac{1}{2} \rho g H^3 - \frac{1}{2} \rho g H^2 \frac{1}{\sin \theta} = \frac{1}{2} \rho g H^2 \frac{1}{\sin \theta} \left(\frac{1}{2} H \sin \theta - \frac{1}{2} H \sin \theta \right)$$

(1.南昌水利发展投资有限公司,江西 南昌 330023; 2.江西省水利规划设计研究院,江西 南昌 330029;
3.江西省水利科学研究院,江西 南昌 330029)

摘要: 为研究台阶式溢洪道的水力特性,采用标准 WES 曲线堰、台阶式溢洪道、反弧挑坎段组成。堰顶采用标准 WES 曲线的三段复合圆弧相接,下游曲线方程为 $y=0.1005x^{1.85}$,台阶尺寸,高 1.50 m、长 1.35 m。

关键词: 台阶式溢洪道; 水力特性; 数值模拟

中图分类号: TV652.1+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2015)03-0218-05

0 引言

台阶式溢洪道由一系列具有跌坎的明渠组成,是将光滑的溢流面做成台阶状,将整个落差分为若干小跌水。当水舌沿台阶逐渐向下宣泄时,在台阶面上形成一个个竖向漩涡,漩涡促使水体剧烈紊动,水面产生大量掺气,从而达到较好的消能效果,并可有效简化下游消能设施,降低工程投资。

随着新型的碾压混凝土筑坝技术的发展,近几十年逐渐在大中型的水利工程中广泛应用。过去很多国内外学者对台阶式溢洪道的水流特性进行研究,如 Y. Yasuda^[1]、Rita F.Carvalho^[2]、H.Chanson^[3] 以及 D.Stephen-son^[4] 等学者对台阶式溢洪道水力特性进行研究。国内也有众多学者对台阶式溢洪道水力特性进行深入的研究,如 1994 年汝树勋等人通过模型试验取得了与上静水坝试验相近的成果^[5]。试验范围内,台阶溢洪道可以消除光滑溢流坝坝趾处动能 44 %~84 %。胡耀华^[6] 对新型联合消能工应用 X 型宽尾墩阶梯掺气空腔影响因素进行研究分析。田嘉宁^[7]、李建中等对台阶式溢洪道的消能率进行了深入研究,得出溢洪道坡度为 19° 和 30° 的消能率的计算方式,模型试验研究结果表明,当坡度为 19° 时,台阶式溢洪道的总消能率可达 95 % 左右,其中台阶段的消能率占总消能率 85 % 以上,结果表明台阶式溢洪道具有非常好的消能效果。本文结合国内拟

建的太湖水库工程可研阶段方案比选,采用标准 $\kappa-\varepsilon$ 双方程紊流模型与 VOF 模型相结合的方法,对台阶溢流坝和光滑溢流坝的水力特性进行数值模拟,对比两种形式的溢流坝在工程应用中的优缺点,比选出最优方案。

1 工程概况

拟建的太湖水库地处江西省寻乌县西北部,是一座以供水为主,兼有灌溉、防洪等综合效益的中型水库,工程等别为Ⅲ等。水库正常蓄水位 456.0 m(黄海高程,下同),坝顶长 345.0 m,最大坝高 75.0 m,水库库容 2 324×10⁴ m³;主要建筑物从左到右布置为左岸刺墙、左岸非溢流坝段、溢流坝段、右岸非溢流坝段及右岸刺墙等(如图 1)。

表 1 水库调洪计算成果表

频率/%	库水位/m	下泄流量/(m ³ ·s ⁻¹)	备注
0.1	459.24	635	校核洪水位
2	458.09	443	设计洪水位

方案一:台阶式溢流坝方案(见图 2)。溢流坝由 WES 曲线堰、台阶段、反弧挑坎段组成。堰顶采用标准 WES 曲线的三段复合圆弧相接,下游曲线方程为 $y=0.1005x^{1.85}$,台阶尺寸,高 1.50 m、长 1.35 m。

方案二:光滑溢流坝方案。溢流坝由 WES 曲线堰、光滑段(坝面坡比 1:0.7)、反弧挑坎段组成,WES 曲线

收稿日期:2015-03-16

基金项目:江西省水利科学基金(2013-2015)项目。

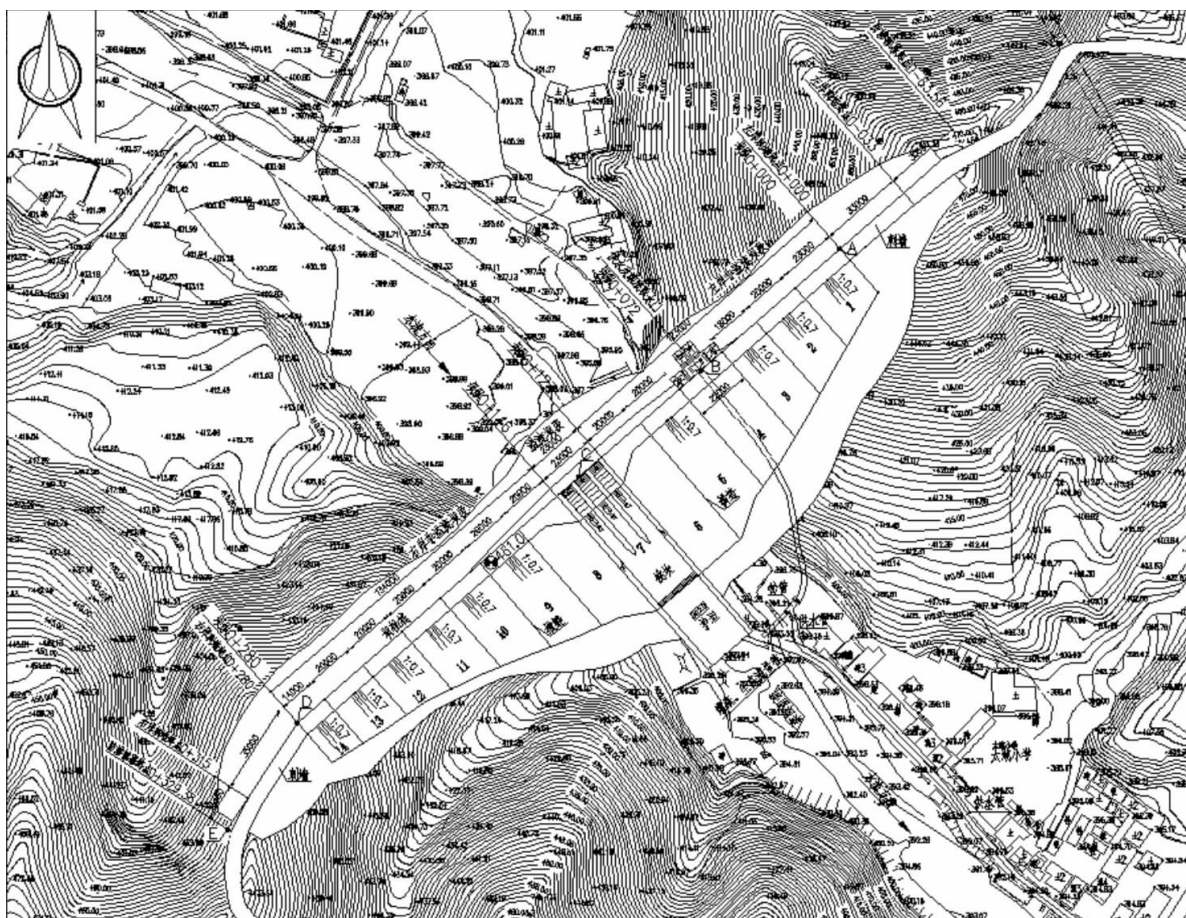


图1 枢纽平面总布置图

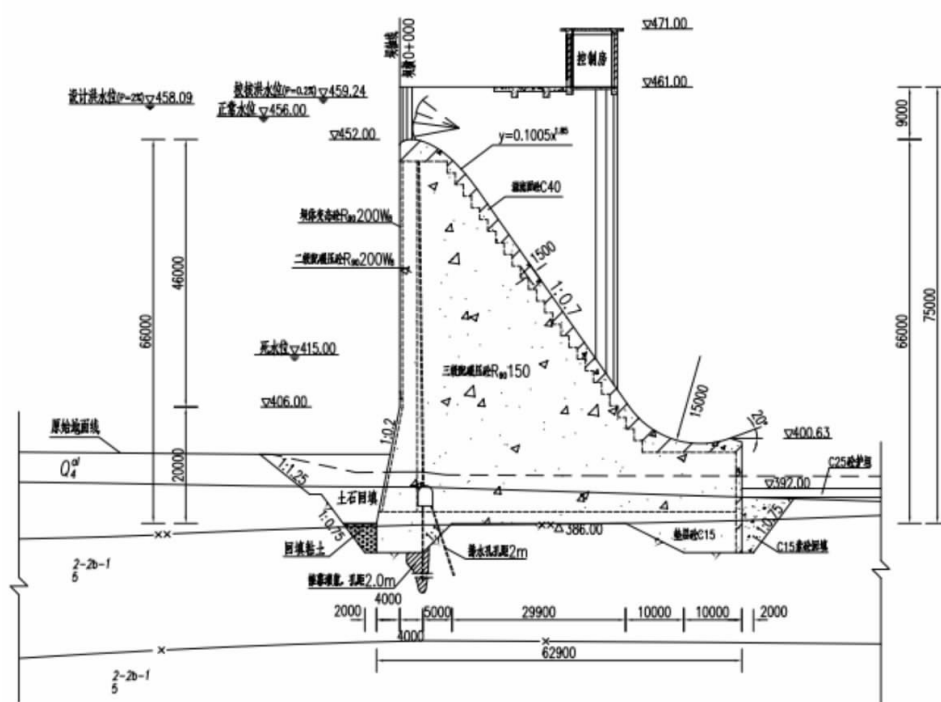


图2 溢流坝剖面图

堰和反弧挑坎段与台阶式溢流坝相同。

2 数学模型

本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程模型对台阶溢流坝流场进行模拟,并用 VOF 法来追踪自由水面,其控制方程如下:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} [(\mu + \mu_t) (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] + \rho g_i \quad (2)$$

$$k \text{ 方程: } \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k (\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\varepsilon \text{ 方程: } \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: t 为时间, x_i 为坐标分量, u_i 为速度分量, μ 为分子粘性系数, ρ 为流体密度, p 为压强, g_i 为 i 方向的重力加速度, μ_t 为湍流粘性系数, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ 为方程常数, G_k 为紊动能产生项。初始紊动能 κ 和紊动耗散率 ε 根据速度值,按经验公式: $\kappa_{in} = 0.00375 \sum u_i^2$, $\varepsilon_{in} = \frac{C_\mu \kappa_{in} (3/2)}{0.012 h_i}$

求得,其中 h_i 为水深。

通过上述方程构成求解流场分布规律的封闭方程组,再根据工况添加相应的边界条件,就可使该方程组变成求解定解问题。

3 计算域及边界条件

本模型计算对象为太湖水库溢流坝段,计算区域取至上游库区 20 m、下游流出边界取自水流平顺的远处至下游区域约 30 m。网格采用结构化网格划分,计算单元个数约 270 万。具体计算区域和边界条件设置如图 3、图 4 所示。其中进口分为气入口和水入口,本文以校核洪水位作为分界线。边界条件和初始条件一并是求解计算的定解条件。边界条件使用 FLUENT 自带的边界条件,只需对边界条件参数进行修改即可,入口边界条件分为水入口和压力入口,上游水入口设为速度入口边界条件;下游水气出口设置为压力出口边界条件;模型顶部为压力入口边界条件;壁面采用无滑移边界条件,对粘性底层采用标准壁函数法处理。

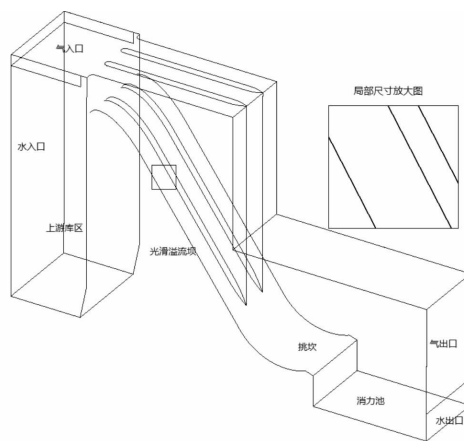


图 3 光滑溢流坝模型

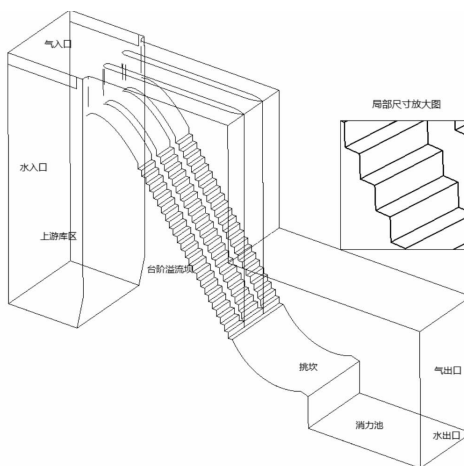


图 4 台阶溢流坝模型

4 结果分析

4.1 压强场

图 5~8 分别为两种型式溢流坝段的压强等值线图。从图中对比可以看出,压强的变化规律为,光滑段的压强很小只有 1~0.5 kPa,大于 1 kPa 的只有很小的一部分;相比之下,台阶面的压强要大的多,最大压强甚至达到 4 kPa。而反弧段的压强规律正好相反,光滑溢流坝的压强比台阶溢流坝的压强要稍大一点,达到 5 kPa。因为水流向下滑行过程中,不断冲击台阶面,故台阶段压强较光滑段大,而在不断冲击台阶面的过程中消耗了大量的动能,所以到达反弧段时,较光滑溢流坝动能小了很多,故光滑溢流坝的反弧段压强大。

4.2 速度场

图 9~12 分别为两种型式溢流坝段的速度等值线图。由图看出,光滑溢流坝的速度较台阶溢流坝的水流

流速要大得多,达到 26 m/s ,而台阶溢流坝的水流流速只有 18 m/s 。而且光滑溢流坝水流流速大于 18 m/s 的区域较台阶溢流坝的大得多。这是因为在台阶的内部存在顺时针旋转的漩涡,台阶面上的滑行水流区域与漩涡区的交界面为剪切面,水流不断的在此进行动能交换,这就是台阶溢流坝比光滑溢流坝消能效果更好的原因所在。从图 7~10 中还可以看出,台阶溢流坝的水深较光滑溢流坝的水深要大,这是因为流速比光滑溢流坝小造成的。

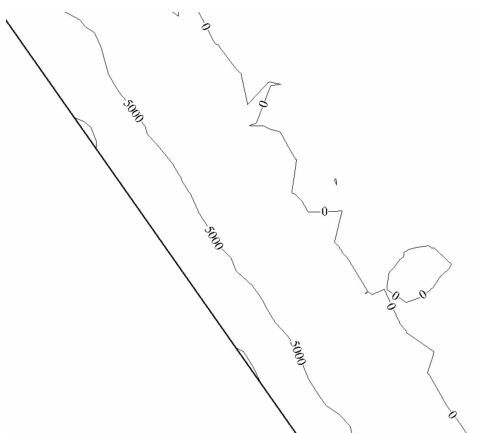


图 5 光滑溢流坝光滑段压强等值线(单位: Pa)

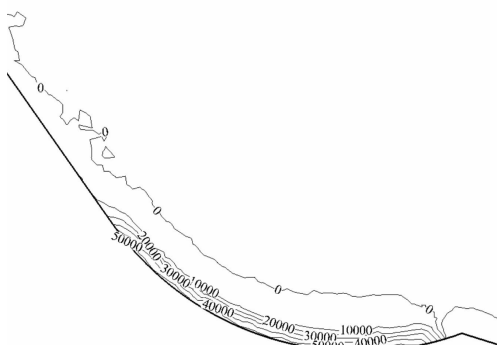


图 6 光滑溢流坝反弧段压强等值线(单位: Pa)

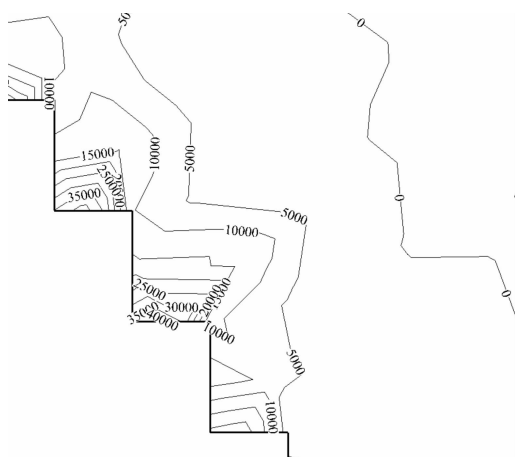


图 7 台阶溢流坝台阶段压强等值线(单位: Pa)

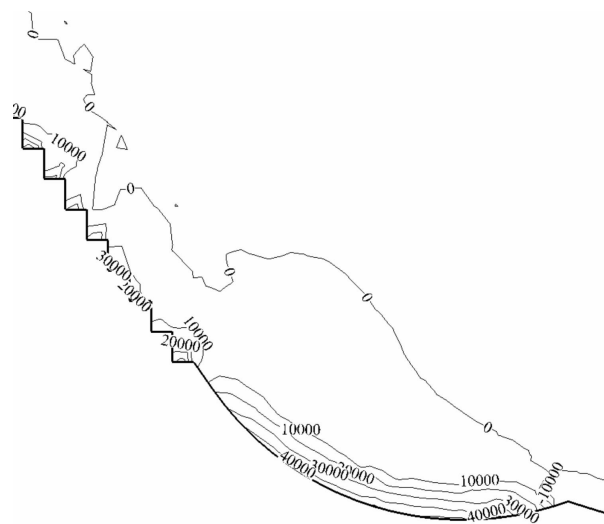


图 8 台阶溢流坝反弧段压强等值线(单位: Pa)

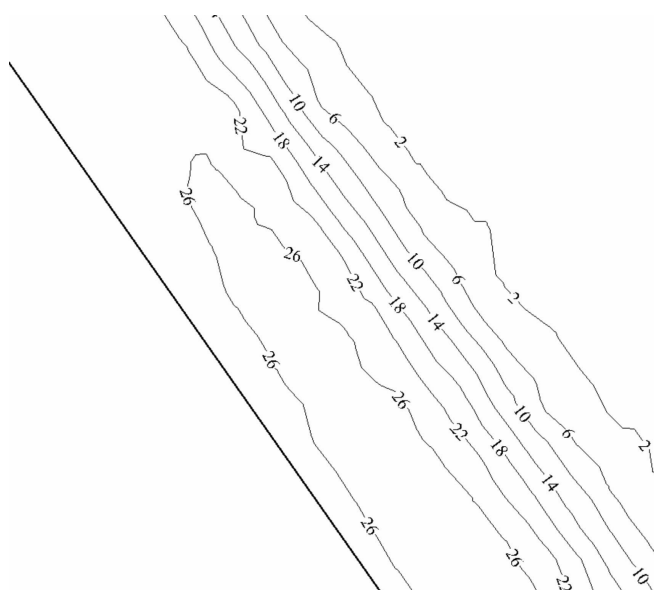


图 9 光滑溢流坝光滑段速度等值线(单位: m/s)

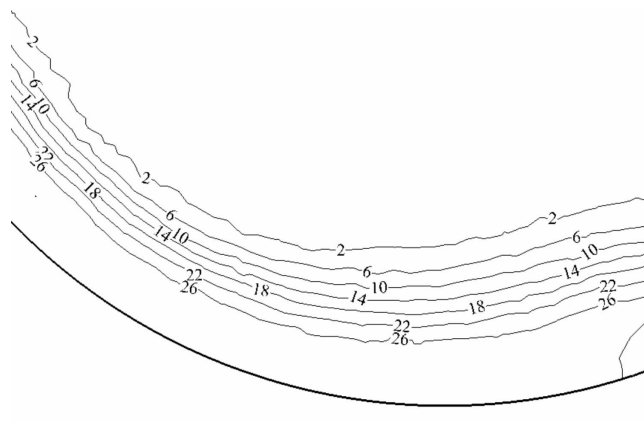


图 10 光滑溢流坝反弧段速度等值线(单位: m/s)

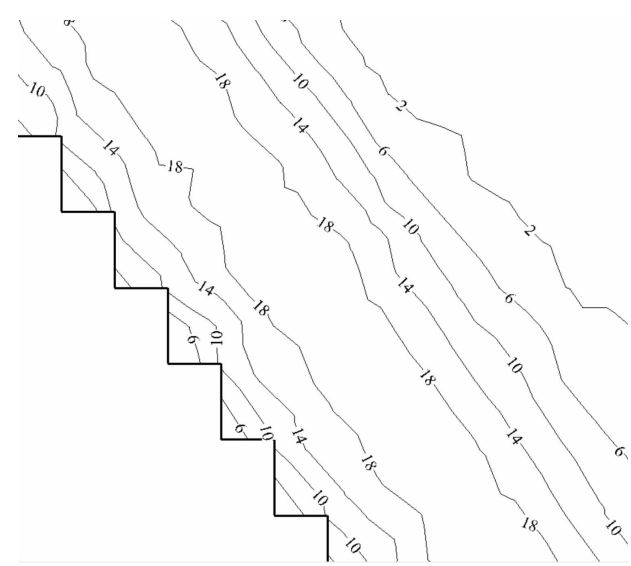


图 11 台阶溢流坝台阶段速度等值线(单位:m/s)

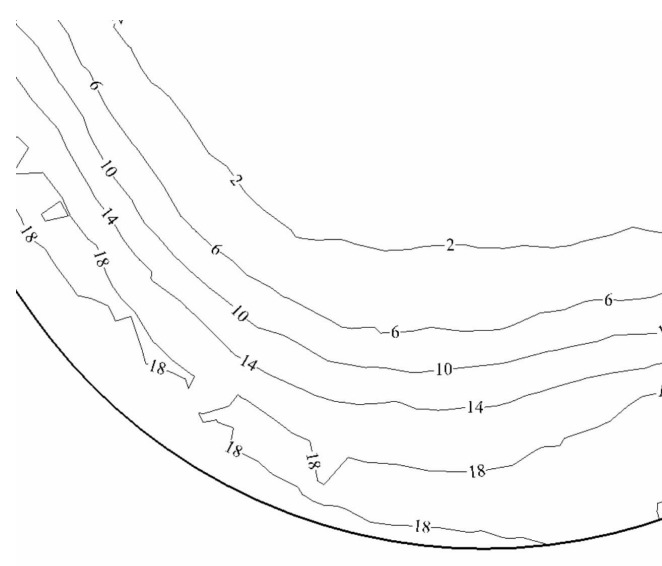


图 12 台阶溢流坝反弧段速度等值线(单位:m/s)

表 2 消能率表

类别	$v_1/(m/s)$	H_1/m	E_1/m	$v_2/(m/s)$	H_2/m	E_2/m	消能率%
光滑溢流坝	0	59.01	59.01	26.22	2.26	37.25	36.88
台阶溢流坝	0	59.01	59.01	15.95	3.76	16.75	71.61

4.3 消能

根据上下游能量守恒原理,用能量的减小与上游总能量之比作为消能率来求台阶式溢流坝的消能率:

$$\eta=\frac{\Delta E}{E_1}\times 100\%=\frac{E_1-E_2}{E_1}\times 100\% \tag{5}$$

式中, E_1 为溢流坝进口处水头表示的水流总能量, $E_1=Z_1+H_1+v_1^2/2g$; E_2 溢流坝反弧段最低点以水头表示的水流总能量, $E_2=H_2+v_2^2/2g$; Z_1 为堰顶与下游消力池底板高差; H_1 为溢流坝上水深; H_2 为反弧段最低点水深; v_1 、 v_2 分别为溢流坝进口段与反弧段最低点的平均流速,流速取水面线(水气比取 0.5)以下至壁面的平均流速。本文因只研究台阶对溢流坝水流特性的影响,不考虑消力池和挑坎对消能的影响,故选反弧段最低点作为下游水流总能量。

从表 2 可以看出,台阶溢流坝的消能率明显高于光滑溢流坝,消能率的增加可有效减少水流对下游的冲刷,从而节约工程成本。

5 结 语

本文介绍了台阶式消能工的应用,并通过标准 K-ε

双方程紊流模型与 VOF 模型相结合的方法,对该工程两个方案进行三维数值模拟,得到压强场、速度场和消能率等水力特性。通过对结果的分析,计算表明在该工程中运用台阶式消能工能极大的提高消能效率,节约溢流坝下游消能设施建设投资,同时降低了下游施工难度。

参考文献:

[1] OHTSU I,YASUDA Y,TAKAHASHI M. Discussion of onset of skimming flow on stepped spillways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127 (6): 522-524.

[2] Rita F.Carvalho,Rui Martins.Stepped Spillway with Hydraulic Jumps: Application of a Numerical Model to a Scale Model of a Conceptual Prototype[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135: 615-619.

[3] Chanson H. Effect of rounding edges of stepped spillways on the flow characteristics, Canadian Journal of Civil Engineering, 2012, 39(2): 140-153.

[4] Stephenson D. Energy dissipation down stepped spillway. Water Power & Dam Construction [J], 1991, (9): 27-30.

[5] 汝树勋,等.曲线形阶梯式溢洪道的消能特性[C].泄水工程与高速水流论文集.成都:成都科大出版社.1994 年 4 期,98-102.

[6] 胡耀华,伍超,张挺,等. X 型宽尾墩阶梯掺气空腔影响因素分析[J].四川大学学报, 2007, 39(3): 24-28.

[7] 田嘉宁,李建中,大津岩夫,等.台阶式溢洪道的消能问题[J].西安理工大学学报, 2002, 18(4): 346-350.