

几种坡度的台阶式溢洪道消能特性试验研究^{*}

田嘉宁¹, 李建中¹, 大津岩夫², 叶林¹, 安田阳一²

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048, 2 日本大学 理工学部, 日本 东京 101-8308)

[摘要] 对3种斜坡(5°、19°和30°)的台阶式溢洪道进行了模型试验研究。结果表明, 当堰上相对临界水深 $y_c/h \leq 2.5$ 时, 滑行水流、过渡水流和跌落水流消能率的大小不受堰上相对临界水深的限制, 而只是相对坝高 H_{dam}/y_c 和斜坡角度的函数, 即随坡度变缓或相对坝高 H_{dam}/y_c 增加, 消能率增大; 当坝坡相同坝高相等时, 滑行水流、过渡水流和跌落水流之间的消能率差异很小, 并且其消能率大小与台阶个数无关; 此外, 文中还给出了计算消能率的经验公式。

[关键词] 台阶式溢洪道; 消能特性; 滑行水流; 过渡水流; 跌落水流

[中图分类号] TV 653; TV 135.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)10-0119-04

台阶式结构作为河流防沙和降低渠道落差等的特殊水工建筑物, 其应用已有3 000多年的历史^[1]。近20多年来, 随着水利工程施工中RCC新技术的普及, 台阶式结构作为中小型水库工程中一种新型的泄水消能形式, 得到了广泛的应用^[2]。另外, 工程实践中台阶式结构还常与其他结构形式共同使用, 构成一种联合消能形式, 大大地提高了消能设施的消能效率。关于台阶式溢洪道滑行水流和跌落水流的消能问题, Chamani^[3]曾指出, 跌落水流的消能率大于滑行水流的消能率; Matos^[4]进一步指出, 当坡度相同时, 随相对坝高增加, 两者的消能率逐渐趋于一致; 而 Rao^[5]和 Chanson^[6]指出, 对于较短的溢洪道, 跌落水流的消能率要比滑行水流大, 但当溢洪道较长时, 滑行水流的消能率却大于跌落水流时的情况; Yasuda^[7]的试验结果证明, 在滑行水流条件下, 随坡度增大, 消能率下降。总之, 关于台阶式溢洪道的消能特性存在着各种不同的说法, 因此, 有必要进一步对其进行深入研究。本研究即通过模型试验, 测定滑行水流、跌落水流和过渡水流的消能率, 以及台阶个数对消能率的影响, 并对其结果进行比较, 以寻求其消能规律及各流况之间的相互关系, 为工程设计提供参考。

1 试验设计

1.1 试验条件

试验水槽宽 $B = 0.4 \text{ m}$, 水槽总长 $L = 5 \sim 20 \text{ m}$,

溢洪道高 $H_{\text{dam}} = 0.625 \sim 2.4 \text{ m}$, 台阶高 $h = 0.05 \sim 0.2 \text{ m}$, 相对坝高 $H_{\text{dam}}/y_c = 6.18 \sim 83.8$, 堰上相对临界水深 $y_c/h \geq 0.156$, 溢洪道斜坡 θ 分别设计为 5°、19°和 30°。

1.2 测定项目与方法

试验中按照 Yasuda^[7]的经验公式对流况进行了分类, 并使水流在消力池内形成临界水跃。鉴于跃前收缩断面的水流特征值量测较困难, 试验中先量测了跃后共轭水深处的水流特征值, 然后利用动量方程, 间接求解出跃前的水流特征值, 并计算了滑行水流、跌落水流和过渡水流的消能率。跃后水深采用测针量测, 测读精度为 0.1 mm。压力采用压力计量测。

2 台阶式溢洪道消能特征

2.1 消能率计算

台阶式溢洪道的结构见图1。在各流况条件下, 调整下游尾水水深, 使其恰好在坝下形成临界水跃。台阶的消能率为:

$$\frac{\Delta H_1}{H_{\text{max}}} = 1 - \frac{H_1}{H_{\text{max}}} \quad (1)$$

式中, $\Delta H_1 = H_{\text{max}} - H_1$; $H_{\text{max}} = y_c + H_{\text{dam}} + \alpha v^2/2g$; $H_1 = y_1 + \alpha v_1^2/2g$ 。其中, v 为堰上行进流速, g 为重力加速度; v_1 为跃前断面平均流速, α 为动能修正系数, 其他符号意义见图1。

^{*} [收稿日期] 2004-04-22

[基金项目] 陕西省自然科学基金项目(2003E218); 陕西省教育厅专项科研基金项目(01JK183)

[作者简介] 田嘉宁(1955-), 男, 甘肃西峰人, 教授, 主要从事水工水力学研究。

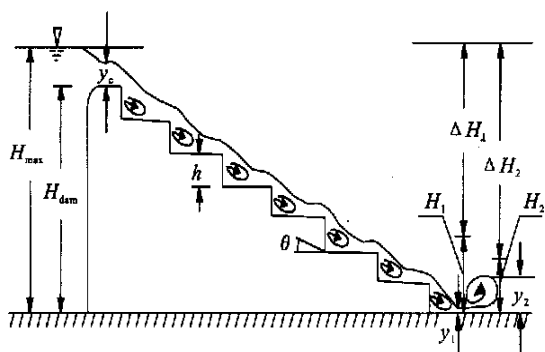


图 1 台阶式溢洪道示意图

Fig 1 Sketch of stepped spillway

考虑到入池水流流线弯曲对 y_1 的影响, 给 y_1 乘以影响系数 λ , 则断面单位能量可表示为:

$$H_1 = y_1 \lambda + \alpha \frac{1}{2} \frac{y_c^3}{y_1^2} \quad (2)$$

$$\lambda = 1 + \frac{1}{\gamma q y_1} \int u \Delta p dy \quad (3)$$

式中, γ 为水的容重; u 为跃前断面上 y 处的流速, 近似用 $u = U (y/y_1)^{1/8}$ 计算, U 为 $y = y_1$ 处的流速; Δp 为因流线弯曲引起的水压力增量, 可用 $\Delta p = \gamma (y_p - y_1) (y_1 - y) / y_1$ 近似计算, y_p 为底面压力实测值。

对于给定的坝高和流量, 分别求解公式 (1), (2), (3), 就可以计算出各流况时台阶的消能率。

2.2 滑行水流的消能率

在 $\theta = 5.7^\circ, 19^\circ$ 和 30° 3 种不同坡度时, 滑行水流 ($y_c/h \leq 2.5$) 的消能率与坝高的关系见图 2。图 2 表明, 其消能率随相对坝高的增加而增大, 并且各坡

度之间消能率的差异随坝高的增加有逐渐减小的趋势。图 2 还表明, 减小斜坡角度, 消能率增加。这是因为在相同落差条件下, 当坡角变缓后, 斜面加长, 同时水平台阶面增大, 流股冲击台阶表面强烈, 并在台阶内形成大尺度的漩涡所致。

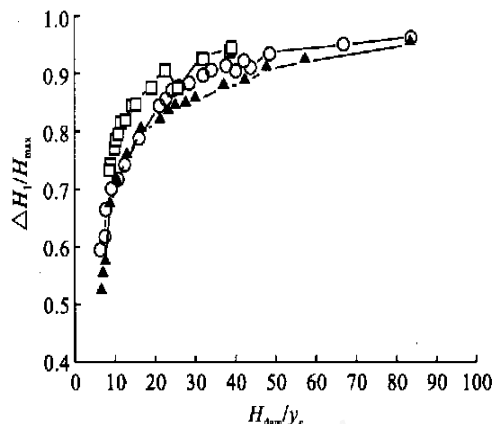


图 2 滑行水流的消能率

-□-, $\theta = 5.7^\circ$; -○-, $\theta = 19^\circ$; -▲-, $\theta = 30^\circ$

Fig 2 Energy dissipation ratio of skimming flow

2.3 过渡水流、跌落水流的消能率

由图 3 和图 4 可以看出, 过渡水流和跌落水流的消能率变化与滑行水流具有相同的趋势, 即当相对坝高增大时, 其消能率增大, 且各坡度之间消能率的差异逐渐缩小; 当斜坡由大变小时, 消能率增大。特别在小坡度跌落水流时, 水股全部跌落在台阶表面, 并在台阶面内形成不完整的水跃现象, 台阶内冲击点水面出现最小值, 而在靠近台阶外侧产生水面壅高现象, 水流掺气非常充分。

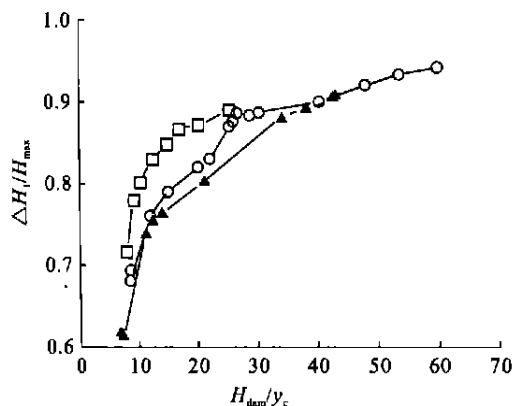


图 3 过渡水流的消能率

-□-, $\theta = 5.7^\circ$; -○-, $\theta = 19^\circ$; -▲-, $\theta = 30^\circ$

Fig. 3 Energy dissipation ratio of transition flow

2.4 各流况消能率比较

比较 3 种不同斜坡上台阶溢洪道各流况的消能率后可知, 对给定的 H_{dam}/y_c , 各斜坡不同流况的消

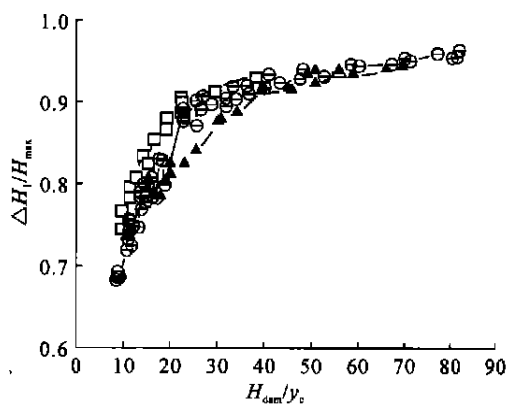


图 4 跌落水流的消能率

-□-, $\theta = 5.7^\circ$; -○-, $\theta = 19^\circ$; -▲-, $\theta = 30^\circ$

Fig. 4 Energy dissipation ratio of nappe flow

能率相差很小。这种情况说明, 如果当 $y_c/h \leq 2.5$ 时, 虽然滑行水流、过渡水流和跌落水流的流况不同, 消能机理有所差别, 但三者水流的掺气均比较充

分, 台阶的形状阻力、掺气和漩涡联合作用, 消杀了通过台阶水流的大量能量, 从而使台阶式溢洪道获得了较大的消能率。在试验条件范围内, 3 种不同斜坡各流况时的消能率最大可达到 90% 以上。对 $\theta=5.7^\circ, 19^\circ$ 和 30° 的试验结果分别进行曲线拟合, 结果如式 (4), (5), (6) 所示。

(1) 当 $\theta=5.7^\circ, y_c/h \leq 2.5$ 时

$$\frac{\Delta H_1}{H_{\max}} = \frac{H_{\text{dam}}/y_c}{3.244355 + 0.979865H_{\text{dam}}/y_c} \quad (4)$$

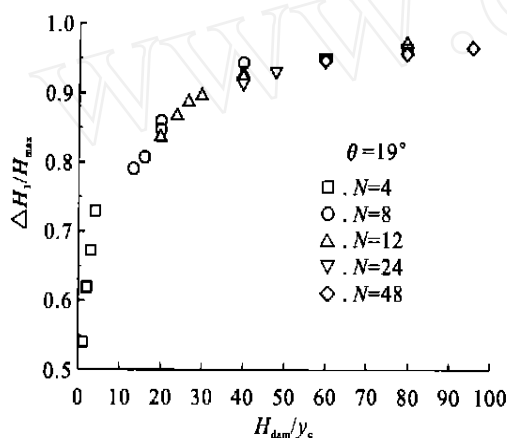
(2) 当 $\theta=19^\circ, y_c/h \leq 2.5$ 时

$$\frac{\Delta H_1}{H_{\max}} = \frac{H_{\text{dam}}/y_c}{4.170425 + 0.9832456H_{\text{dam}}/y_c} \quad (5)$$

(3) 当 $\theta=30^\circ, y_c/h \leq 2.5$ 时

$$\frac{\Delta H_1}{H_{\max}} = \frac{H_{\text{dam}}/y_c}{4.959454 + 0.981809H_{\text{dam}}/y_c} \quad (6)$$

误差分析表明, 式 (4), (5), (6) 与试验结果的相关系数分别为: $R_{5.7} = 0.98904$, $R_{19} = 0.99285$, $R_{30} = 0.98061$; 残差平方和分别为: $Q_{5.7} = 0.00395$, $Q_{19} = 0.00951$, $Q_{30} = 0.02315$; 剩余标准差分别为: $S_{5.7} = 0.01188$, $S_{19} = 0.01104$, $S_{30} = 0.02110$ 。



若进一步将式 (4), (5), (6) 综合考虑, 可得到一个统一的经验公式 (7):

$$\theta \leq 30^\circ, y_c/h \leq 2.5$$

$$\frac{\Delta H_1}{H_{\max}} = \frac{H_{\text{dam}}}{ay_c + 0.9816399H_{\text{dam}}}$$

$$a = 0.0705475\theta + 2.838429 \quad (7)$$

分析表明, 式 (7) 与式 (4), (5), (6) 的绝对误差分别小于 1.68‰, 0.02‰ 和 0.2‰。

2.5 过渡水流、跌落水流消能率与台阶个数 N 的关系

在过渡水流和跌落水流流况时, 变化其斜坡角度、台阶高度及来流量, 对台阶式溢洪道的消能特性进行对比试验。结果表明, 当斜坡角度 $\theta \leq 30^\circ$ 时, 在过渡水流、跌落水流状态下, 台阶式溢洪道的堰上临界水深不再成为影响台阶掺气的主要因素。这说明当堰上水深较小时, 各台阶上的掺气都比较稳定和充分。由图 5 可见, 当坡度一定, 坝高相同时, 消能率不受台阶个数的影响, 增加相对坝高, 消能率增大; 当 $H_{\text{dam}}/y_c \geq 60$ 时, 消能率增大的趋势变得很缓慢。

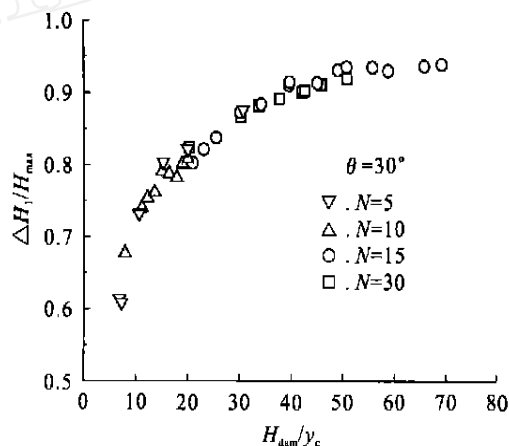


图 5 消能率与台阶个数的关系

Fig 5 Relation of energy dissipation ratio and step number

3 结 论

本试验结果表明, 当斜坡角度 $\theta \leq 30^\circ$; 堰上相对临界水深 $y_c/h \leq 2.5$ 时, 堰上临界水深对消能率的影响较小; 滑行水流、过渡水流和跌落水流的消能率随相对坝高增加而增大, 随斜坡角度增大而减小, 在试验条件范围内, 不同斜坡各流况时的消能率最大可达到 90% 以上, 且随坝高增加, 3 种坡度的消能率

差别逐渐减小, 这与 Matos^[4] 的结论一致。另外, 文中还给出了计算消能率的经验公式, 3 种流况的消能机理虽有所区别, 但它们之间的消能率差别甚小; 当坝坡相同、坝高相等时, 台阶的数量不影响其消能率的大小。

本次试验的台阶坡度仅限于小于 30° 的情况, 还未触及台阶式溢流坝的消能等问题, 今后需进一步扩大研究的范围及内容。

[参考文献]

- [1] Chanson H. Hydraulics of stepped spillways: current status[J]. Journal of Hydraulic Engineering, A SCE, 2000, 9: 636- 637.
- [2] 陈 群, 戴光清. 鱼背山水库岸边阶梯溢洪道流场的三维数值模拟[J]. 水力发电学报, 2002, (3): 62- 71.
- [3] Chamani M R, Rajaratnam N. Discussion about jet flow on stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, A SCE, 1995, 5: 446- 448.
- [4] Matos J, Quintela A. Discussion about jet flow on stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, A SCE, 1995, 5: 443- 444.
- [5] Rao P V, Rao P L N. Discussion about jet flow on stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, A SCE, 1995, 5: 444- 445.
- [6] Chanson H. Discussion about jet flow on stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, A SCE, 1995, 5: 441- 442.
- [7] Yasuda Y, Takahashi M, Ohtsu I. Energy dissipation of skimming flows on stepped chute[A]. Chinese Hydraulic Engineering Society. 29th IAH Congress Proceedings[C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 531- 536.

The dissipation characteristics on stepped spillways of different slopes

TIAN Jia-ning¹, LI Jian-zhong¹, Ohtsu Iwao², YE Lin¹, Yasuda Yoichi²

(1 Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 College of Science and Technology, Nihon University, Tokyo 101-8308, Japan)

Abstract: The model experiment on stepped spillway with three different slopes (5.7° , 19° and 30°) shows that energy dissipation ratio under skimming flow, transition flow or nappe flow, would not be confined by the relative critical water depth on weir ($y_c/h \leq 2.5$), and it is only the function of relative dam height (H_{dam}/y_c) and angle of slope. Energy dissipation ratio increases while slope grading down or H_{dam}/y_c rising. When H_{dam}/y_c is certain, the difference of energy dissipation ratio under skimming flow, transition flow and nappe flow is insignificant and the number of steps does not affect the energy dissipation ratio. In addition, this paper offers the experiential formula to calculate the energy dissipation ratio.

Key words: stepped spillways; dissipation characteristics; skimming flow; transition flow; nappe flow

(上接第 118 页)

Synthesis of 6-methyl-1-substituted phenyl-1, 4-dihydro-4-oxo-pyridazine-3-carboxylic acids

MA Yang-min, SHI Qing-hua

(College of Forestry, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 5 new pyridazinone compounds, together with 3 known pyridazinone compounds were synthesized through coupling and rearrangement reactions from substituted phenyl diazonium salts and 4-hydroxy-6-methyl-2-pyrone which were prepared from malonic acid and acetone via 4 steps. The structures of 8 compounds were determined by elemental analysis, IR, and $^1\text{H-NMR}$.

Key words: pyridazinone; coupling reaction; structure characterization