

治沟骨干工程台阶式泄水建筑物的消能防冲研究

田嘉宁¹, 李建中¹, 高桥正行²

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 2. 日本大学 日本 东京 101-8308)

摘要: 进行了可用于治沟骨干坝的 3 种不同坡度的台阶式泄水建筑物的模型试验。结果表明, 在跌落水流时, 消力池跃前断面单位能量随斜坡变陡和相对坝高 H_{dam}/y_c 增加而增大, 但当 H_{dam}/y_c 增加到某一值后, 逐渐趋于平缓。消力池跃前断面底部压力 y_p 与堰上临界水深 y_c 呈现正比线性相关, y_p 大小与台阶个数 N 无关。比较跃前断面压力修正系数 $\lambda > 1$ 和 $\lambda = 1$ 时的消能率, 当 $H_{dam}/y_c = 10$ 左右时, 其消能率相对误差可达 7% 左右, 但当 $H_{dam}/y_c \geq 70$ 时, 其相对误差则降至 1%。试验结果也同时显示出 λ 与 y_p/y_1 同样有着很好的线性关系, 其相关系数 $r = 0.99999$ 。

关键词: 骨干坝; 跌落水流; 台阶式泄水建筑物; 消能防冲

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2005)02-0001-04

中图分类号: TV133

Energy Dissipation and Erosion Control of Stepped Overflow Structure on Key Dam of Gully Correction

TIAN Jia-ning¹, LI Jian-zhong¹, TAKAHASHI Masayuki²

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China; 2. Nihon University, Tokyo 101-8308, Japan)

Abstract: Modelled tests on a key dam show that, under nappe flow over three different slopes on a stepped overflow structure, unit energy in the flow cross section before the hydraulic jump increases with increasing slope, and H_{dam}/y_c similarly increases. As H_{dam}/y_c approaches a certain value, the rate of increase in the unit energy in the flow cross section slows. The pressure y_p at the bottom of the cross section before the hydraulic jump in stilling basins demonstrates a positive linear correlation with critical water depth y_c to the water crest, with the number N of the steps not affecting y_p . Comparison of energy dissipation ratios at $\lambda > 1$ and $\lambda = 1$ (λ is the correction factor for pressure at the cross section before a hydraulic jump) reveals that the relative error amounts to about 7% when $H_{dam}/y_c = 10$, with this error decreasing to 1% when $H_{dam}/y_c \geq 70$. Experimental results also show that λ has a very strong linear correlation with y_p/y_1 ($r = 0.99999$).

Keywords: key dam; nappe flow; stepped overflow structure; energy dissipation and erosion control

骨干坝能有效控制流域的洪水泥沙, 减少水土流失, 抑制沟岸扩张和沟底下切, 是整个流域淤地坝系防洪安全的重要保证。黄土高原流域的骨干坝枢纽结构比较简单, 多采用土料修筑淤地坝, 其泄水建筑物表面一般也多不衬砌, 有些工程甚至不修建泄水建筑物。由于骨干坝设计洪水水平较低, 不合理的泄水设施, 使得骨干坝一旦遭遇较大洪水, 泄水建筑物坡面往往受到水流冲刷而破坏, 或洪水翻越坝顶, 产生表面过流, 使整个坝体毁坏, 甚至使整个坝系发生连锁水毁。代表新一代消能工程的台阶式泄水建筑物, 可采用条石、块石砌筑, 或混凝土护面^[1]。一方面由于台阶的掺气、摩擦等, 增加了消能效率。尤其在小流量泄流时, 台阶式结构表现出比光滑面结构更高的

消能效率^[2-3]。另一方面, 台阶式泄水建筑物可以就地取材, 造价低廉, 非常适用于像骨干坝这种投资不大的中小型土石坝。

台阶式泄水建筑物的水流流况, 根据其相对临界水深 y_c/h (h 为台阶高度, y_c 为堰上临界水深, $y_c = (q^2/g)^{1/3}$, q 为单宽流量, g 为重力加速度) 和泄槽倾斜角度 θ 分成滑行水流, 过渡水流和跌落水流 3 类^[4]。跌落水流较滑行水流流况复杂, 因此, 研究结果很少, 有必要进一步对其深入研究。本文对几种不同坡度的台阶式泄水建筑物, 在跌落水流流况下, 消力池产生临界水跃时的跃前断面能量、跃前、跃后水深、跃前压力水头及压力修正系数等进行了研究, 以期治沟骨干坝的设计、施工提供参考。

1 试验条件

治沟骨干坝的 3 种不同坡度的台阶式泄水建筑物的模型试验是在一座用有机玻璃制成的台阶式水槽内进行。模型上游与供水箱连接, 下游台阶末端直接与矩形水平槽连接, 不设反弧段。试验水槽宽为 $B=40\text{ cm}$, 台阶段水槽长约为 $L=100\sim 700\text{ cm}$, 台阶高约为 $h=5\sim 20\text{ cm}$, 模型高约为 $H_{\text{dam}}=62.5\sim 240\text{ cm}$, 泄水槽斜坡角度 θ 分别设计为 5.7° , 19° 和 30° , 泄水建筑物高度与堰上临界水深的比值 H_{dam}/y_c 为 $5.5\sim 82$, 堰上临界水深与台阶高的比值 y_c/h 为 $0.155\sim 0.753$, 模型各符号的定义如图 1 所示。

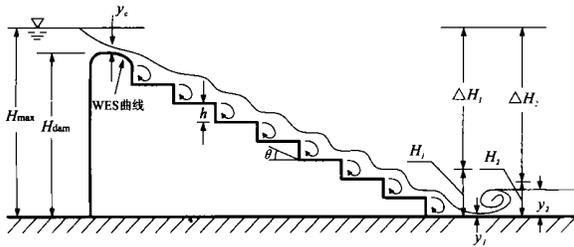


图 1 模型各符号定义

2 结果分析

2.1 跌落水流跃前断面单位能量 H_1

根据水流能量转换和守恒条件, 当下游消力池形成临界水跃时, 其跃前断面的单位能量可表示为:

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{\alpha q^3}{2gy_1^2} + y_1 \\ &= \frac{\alpha y_c^3}{2y_1^2} + y_1 \end{aligned} \quad (1)$$

由于水流直接从台阶跌入下游消力池, 引起跃前断面流线弯曲, 底部压力增大。因此, 应给跃前断面水深 y_1 乘以修正系数 λ , 以修正断面单位能量^[5], 则

(1)式变为:

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

λ 用下式计算:

$$\lambda = 1 + \frac{1}{\gamma q y_1} \int_0^{y_1} u \Delta p dy \quad (3)$$

式中: α ——动能修正系数; y_1 ——跃前断面水深; γ ——水的容重; u ——跃前断面铅垂线上任意点流速; Δp ——因流线弯曲引起的水压力增量, u , Δp 可按文献 [2] 推荐的公式计算, 即:

$$u = U \left(\frac{y}{y_1} \right)^{1/8} \quad (4)$$

$$\Delta p = \frac{\gamma (y_p - y_1) (y_1 - y)}{y_1} \quad (5)$$

式中: U —— $y=y_1$ 时流速值; y_p ——跃前断面底部实测压力水头值; y ——测点距消力池底板的距离。

整理 3 种不同坡度时断面单位能量 H_1/y_c 与相对坝高 H_{dam}/y_c 的关系, 由图 2 可见, 跌落水流断面单位能量随台阶式泄水建筑物斜坡角度 θ 增加而增大, 当相对坝高相等时, 这 3 种坡度之间的 H_1/y_c 值大小顺序可按斜坡角度由小到大依次排列。这说明随斜坡角度增大, 消能率降低。

另外, H_1/y_c 虽随相对坝高加大而呈现缓慢增加的趋势, 但与 H_{dam}/y_c 增长的比例相比, H_1/y_c 的变化相对较小。这种变化趋势进一步表明, 消能率虽随 H_{dam}/y_c 增大而增大, 但增长的速率逐渐减弱。这和消能率试验结果是完全吻合的(见图 3)。

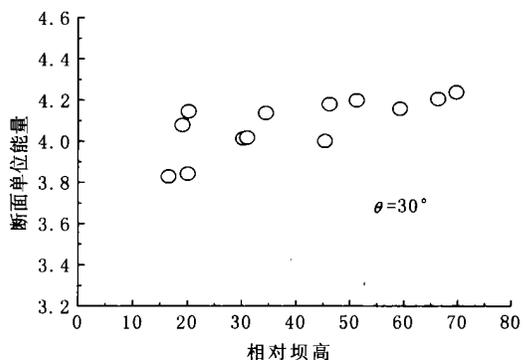
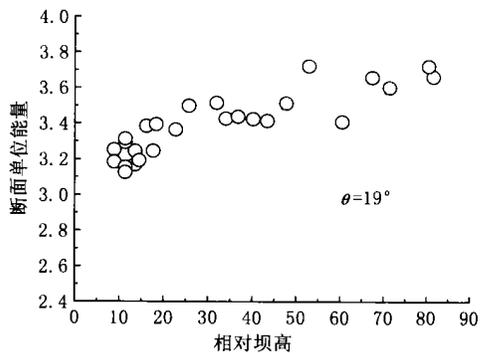
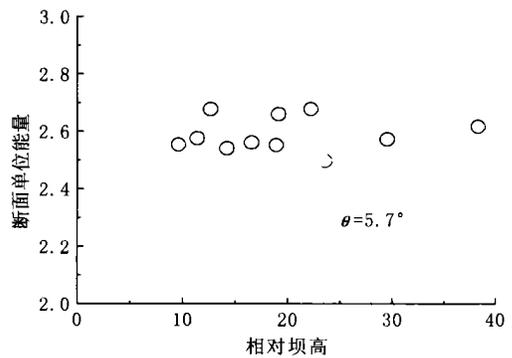


图 2 跌落水流跃前断面单位能量

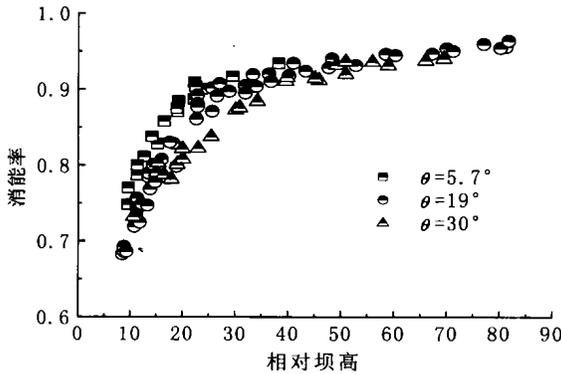


图 3 三种坡度跌落水流消能比较

2.2 跌落水流跃前断面底部压力水头 y_p

跌落水流直接冲击消力池底板,使跃前断面处的底板压力大于该断面的静水压力。试验中把底面压力最大点作为临界水跃的跃前断面,其水深视为跃前共轭水深 y_1 。整理其试验资料如图 4 所示。

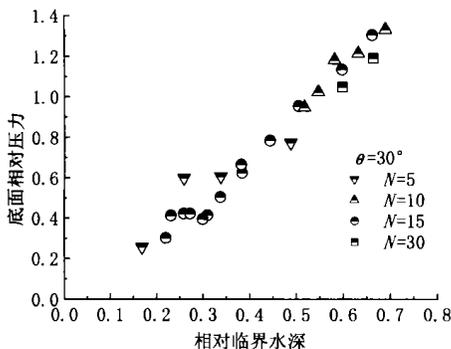
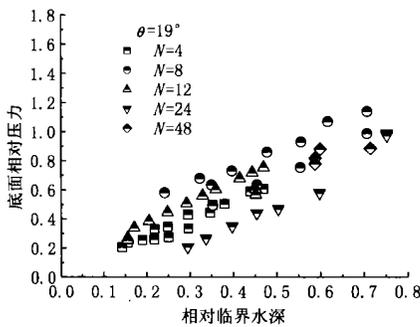
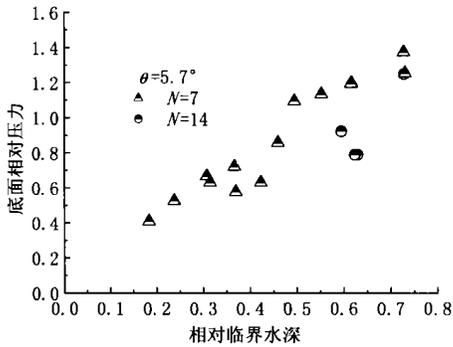


图 4 跌落水流 y_p/h 与 y_c/h 关系

在 3 种不同坡度时,其底面相对压力与相对堰上临界水深呈正比线性分布关系;除 19° 部分试验点稍有点偏离外,相对压力大小与台阶个数 N 关系似乎不大,不同台阶个数时压力大小都随临界水深增加而变大。由试验知 y_p 与 y_c 之比平均值约 $1.46 \sim 1.84$ 。

2.3 跌落水流压力修正系数 λ

由式(2),(3)知, λ 的大小直接影响跃前断面单位能量值的变化。与跃前断面水深 y_1 产生的静水压力相比,其压力达 2 倍以上,有些点甚至更高。故在计算消能率时须考虑 λ 对单位能量的影响,否则所计算的消能率可能过大。图 5 分别给出了考虑 $\lambda(\lambda > 1)$ 和不考虑 $\lambda(\lambda = 1)$ 时,3 种坡度消能率的变化。

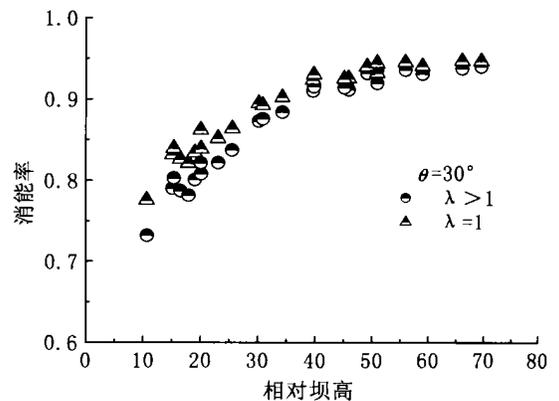
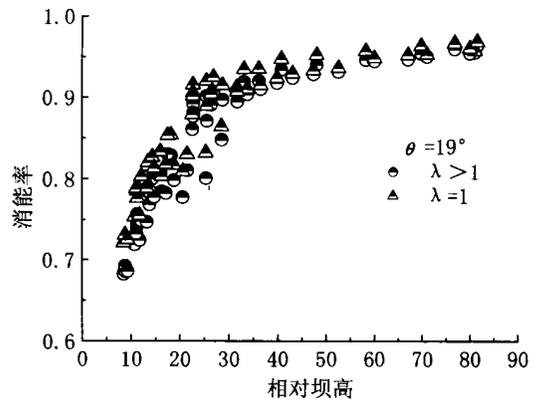
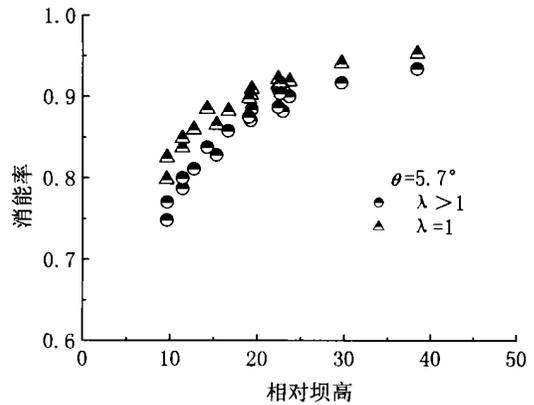


图 5 压力修正系数与消能率的关系

由图可见,当 $\lambda=1$ 时,消能率普遍大于 $\lambda>1$ 时的消能率。当相对坝高较低(如 $H_{\text{dam}}/y_c=10$)时,两者的消能率相差较大,其相对误差最大可达7%左右;但当相对坝高逐渐增大时,该相对误差逐系渐变小,当 $H_{\text{dam}}/y_c \geq 70$ 时,相对误差已降至1%。这说明 λ 值对低坝或大流量时反映比较敏感。

另外,整理 λ 值与 y_p/y_1 的试验结果(见图6),3种不同坡度的结果显示非常好的线性相关性,即 λ 值随 y_p/y_1 的增加而增大,并与斜坡角度无关。进一步对其结果进行曲线拟合,得到(6)式所示的经验公式,其相关系数 $r=0.99999$ 以上。

$$\lambda=0.53292579+0.4695365y_p/y_1 \quad (6)$$

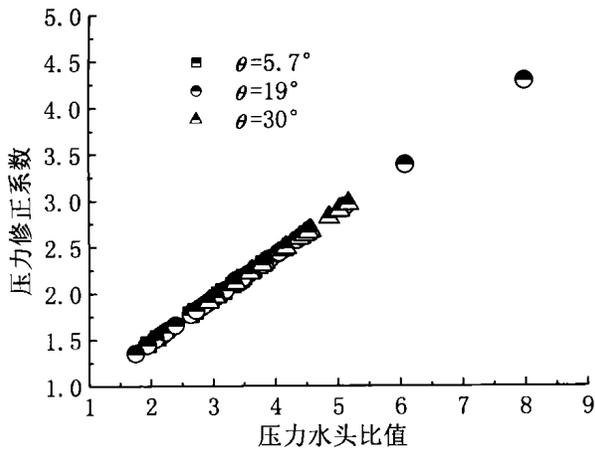


图6 压力修正系数与压力水头比值 y_p/y_1 的关系

3 结语

模型试验证明,当治沟骨干工程台阶式泄水建筑物的坡度分别设定为 5.7° 、 19° 和 30° 时,在跌落水流流况下,消力池跃前断面单位能量 H_1/y_c 随相对坝

高 H_{dam}/y_c 增加而增大,当相对坝高相等时,这3种坡度的 H_1/y_c 值的大小顺序可按斜坡角度由小到大依次排列。说明斜坡角度越大,消能率越低。

另外, H_1/y_c 值虽随 H_{dam}/y_c 增加而增大,但相对 H_{dam}/y_c 增长较为缓慢,说明能量耗散逐渐趋于一种相对平衡状态。消力池跃前断面的底部压力水头 y_p 与堰上临界水深 y_c 的试验结果显示,3种不同坡度的 y_p 与 y_c 均表现出良好的线性关系,同时也显示出 y_p 大小与台阶个数 N 无关。跃前断面静水压力修正系数 $\lambda>1$ 和 $\lambda=1$ 两种情况的消能率说明,当相对坝高较低时,两者的相对误差最大,当 $H_{\text{dam}}/y_c=10$ 时,可达7%左右;但当相对坝高 $H_{\text{dam}}/y_c \geq 70$ 时,其相对误差约为1%。文中进一步对 λ 和 y_p/y_1 的关系进行曲线拟合,给出了经验公式,其相关系数 $r=0.99999$ 以上,显示出两者具有非常好的线性相关性。

[参 考 文 献]

- [1] Rice Charles E, Kadavy Kem C. Model Study of a Roller Compacted Concrete Stepped Spillway [J]. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 1996(6): 292—297.
- [2] Yasuda Y, Takahashi M, Ohtsu I. Energy Dissipation of Skimming Flows on Stepped Chute [A]. 29th IAHR congress proceedings theme, Beijing, Tsinghua University Press 2001. 531—536.
- [3] 田嘉宁, 天津岩夫, 李建中, 等. 台阶式泄水建筑物各流况的消能特性 [J]. 水利学报, 2003(4): 35—39.
- [4] Yasuda Y, Ohtsu I. Flow Resistance of Skimming Flow in Stepped Channels [A]. Proceeding of the 28th Biennial Congress Spillways and Chute Structures, B14, IAHR, 1999. (CD-ROM).
- [5] 岩佐义郎著. 水理学 [M]. 朝仓书店株式会社发行, 1994. 3.