

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.05.008

上游边坡系数对折线型实用堰流量系数的影响

陈月君¹, 顾晓峰², 傅宗甫¹, 陈青生¹, 崔 贞¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215128)

摘要:为系统地分析无侧收缩折线型实用堰(简称折线堰)上游边坡系数对自由堰流流量系数的影响规律,采用VOF(volume of fluid method)方法和RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型对下游边坡直立、上游边坡系数依次为0、0.3、0.5、0.8、1.0、1.5和2.0的7个折线堰模型进行数值模拟。数值模拟结果表明,随着堰顶总水头的增加,水面线曲率减小,流量系数增大,同时上游边坡系数对流量系数的影响逐渐减小。采用多元非线性回归方法建立了含有上游边坡系数的折线堰流量系数计算公式,该公式在堰顶总水头一定时,流量系数随着上游边坡系数先增大后减小。

关键词:折线型实用堰;自由堰流;数值模拟;VOF方法;上游边坡系数;水面线;流量系数

中图分类号:TV65; TV132⁺.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)05-0425-08

Effects of slope coefficient in the upstream side on the discharge coefficient of broken-line practical weirs

CHEN Yuejun¹, GU Xiaofeng², FU Zongfu¹, CHEN Qingsheng¹, CUI Zhen¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Tai Lake Water Conservancy Planning Design Institute Co., Ltd., Suzhou 215128, China)

Abstract: To systemically study the effect of varying slope coefficients in the upstream side on the discharge coefficient at free overflow over a broken-line practical weir with vertical downstream face and without lateral contraction, different slope coefficients of upstream side, including 0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 and 2.0, are simulated by the volume of fraction (VOF) method and the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. Numerical results show that the rising of total head H_0 reduces the curvature of free surface profile and increases the discharge coefficient. Meanwhile, the influence of slopes in upstream side on the discharge coefficient decreases with H_0 . Furthermore, a discharge coefficient formula including the variable slope coefficient of upstream side is derived based on the method of non-linear regression, in which as the slope coefficient of upstream side increases, the discharge coefficient increases firstly and then decreases for a given H_0 .

Key words: broken-line practical weir; free flow; numerical simulation; volume of fluid method; slope coefficients of upstream side; water surface profile; discharge coefficient

折线型低堰作为水利工程中常见的挡、泄水建筑物,被广泛地应用于农田灌溉系统和水利水电工程中,主要作用测定流量和拦蓄水流。矩形堰按照相对堰顶长度 H/δ 可分为长顶堰($0 < H/\delta \leq 0.1$)、宽顶堰($0.1 \leq H/\delta \leq 0.4$)、实用堰($0.4 \leq H/\delta \leq 1.5 \sim 1.9$)和薄壁堰($1.5 \sim 1.9 \leq H/\delta$)^[1],其中实用堰和宽顶堰最为常见。来流条件相同时,宽顶堰的流量系数大致为0.320~0.385^[2],而实用堰约为0.33~0.46^[3],可见后者具有更

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2017B625X14);江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX17_0439);江苏高校优势学科建设工程资助项目(YS11001)

作者简介:陈月君(1990—),女,博士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:chen-yuejun@hhu.edu.cn

引用本文:陈月君,顾晓峰,傅宗甫,等.上游边坡系数对折线型实用堰流量系数的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):425-432.

CHEN Yuejun, GU Xiaofeng, FU Zongfu, et al. Effects of slope coefficient in the upstream side on the discharge coefficient of broken-line practical weirs[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(5): 425-432.

强的泄流能力。按剖面形状实用堰分为曲线型和折线型,前者有各种定型设计,例如 WES 剖面、克-奥剖面等,后者从纵剖面形态又分为矩形和梯形实用堰。对于小型溢流坝而言,虽然曲线型的流量系数稍大于折线型,但折线型实用堰以其设计简单和施工方便而得到更广泛的应用^[4]。此外,矩形实用堰具有对下游淹没低敏性的特点,在特殊情况下通过优化几何构型可增加泄流能力,避免堰流结构遭受空蚀破坏^[5]。

前人对影响泄流能力的堰高、堰顶长度以及堰顶入口形状等几何参数进行了大量研究^[1,6-8],并推导出了多种形式的流量系数公式^[1,3,9-10]。虽然已有研究表明实用堰的上游边坡系数(坡面水平距离与垂直高度的比值)与流量系数关系密切^[8,11],但现阶段关于上游边坡系数对流量系数的影响研究却相对较少。Farhoudi 等^[12]、Azimi 等^[13]、Goodarzi 等^[14]对堰顶入口的水流分离现象进行了研究,认为分离区域会随着上游坡角的减小而减小。Bos^[8]认为该区域较大的流线曲率和较小的空间尺寸对堰流具有积极的影响,上游坡角的存在直接影响堰顶流线的曲率,该曲率对实用堰的水头-流量关系有着重要的影响。张绍芳^[15]、董海鸿等^[2,6,10]为研究实用堰的水力特性进行了大量的工作,并取得了一些进展。文献[16]指出下游边坡直立、上游边坡系数为 0.5 的梯形实用堰的流量系数可采用加大 2.0% 的矩形实用堰流量系数,且前者的水流流态优于后者,在工程中宜优先考虑^[16]。Haun 等^[17]运用 Flow-3D 计算了梯形宽顶堰的上游水位和堰流流量系数,并与 Sargison 等^[18]的试验数据对比,两者吻合度较高。Paik 等^[19]采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型计算了矩形宽顶堰的自由表面流动,与水工模型试验相比,堰前以及堰顶水流分离区域模拟相似度极高。可见,数值模拟的方法在精度上满足自由堰流水流特性研究的要求。

上述研究是以来流流量作为先决条件,而本文以堰顶总水头作为先决条件,在工程应用中具有更强的可操作性。此外,前人在研究上游边坡系数对流量系数的影响时,未将边坡系数考虑到已推导的流量系数公式中去。为满足折线堰工程设计和应用的高精度需求,展开上游边坡系数对折线堰流量系数影响规律的探究工作迫在眉睫。为实现流量系数公式中折线堰上游边坡系数与流量系数的一一对应,笔者使用 Flow-3D 软件模拟了堰流状态下具有不同上游边坡系数的矩形折线堰的过堰水流,并系统地分析了上游边坡系数对实用堰自由表面和泄流能力的影响;通过非线性回归方法得到了包含上游边坡系数的流量系数公式,以期对折线堰的工程设计提供参考。

1 折线型实用堰流量系数的影响因素分析

在多数测流结构中,流量系数分析一般采用量纲分析法。无侧收缩折线堰(简称折线堰)的流量系数取决于过堰的水力条件、几何构型、和流体性质^[20]:

$$F(Q, H_0, B, \delta, P, S_1, g, \sigma, \rho, \mu) = 0$$

(1)

其中
$$H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}$$
式中: Q ——下泄流量; H_0 ——堰顶总水头; B ——堰顶宽度; δ ——堰顶长度; P ——堰高; S_1 ——折线堰的上游边坡系数; g ——重力加速度; σ 、 ρ 、 μ ——流体的表面张力系数、密度、动力黏性系数; H ——堰上水深; v_0 ——行进流速。

根据布金汉(Buckingham) π 定理,选取 H_0 、 g 、 ρ 为基本量纲,由量纲分析法推导出无量纲组合数之间的关系为

$$\frac{Q}{B\sqrt{2g}H_0^{\frac{3}{2}}} = f\left(\frac{\delta}{H_0}, \frac{P}{H_0}, S_1, \frac{\rho^{\frac{1}{2}}g^{\frac{1}{2}}H_0}{\sigma^{\frac{1}{2}}}, \frac{\rho g^{\frac{1}{2}}H_0^{\frac{3}{2}}}{\mu}\right)$$

(2)

式(2)左边为折线堰堰流流量系数(m)公式,右边前 3 项描述了实用堰的几何构型对流量系数的影响,最后 2 项分别表征液体表面张力和黏性对流体的影响。Isaacs^[21]、Rangaraju 等^[22]认为 H 保持在 5.0 cm 以上可以避免表面张力和水流黏性对实用堰过堰水流的影响。由于本文试验方案的 H 均大于 5.0 cm,因此液体表面张力和流体黏性对流量系数的影响忽略不计,方程(2)可简化为

$$\frac{Q}{B\sqrt{2g}H_0^{\frac{3}{2}}} = f\left(\frac{\delta}{H_0}, \frac{P}{H_0}, S_1\right)$$

(3)

在 δ 、 P 、 B 为常数的前提下,研究 H_0 、 S_1 对折线堰流量系数的影响规律。

2 数学模型的建立

2.1 控制方程

不可压缩的三维黏性流体的控制方程采用笛卡尔坐标系下的时均连续性方程和 RANS 方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

(4)

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

(5)

式中: u_i, u_j ——速度分量; f_i ——质量力; p ——压强; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ ——雷诺切应力项。

Flow-3D 采用 Hirth 等^[23]提出的 VOF (volume of fluid method) 方法预测自由表面的流动,计算流体分数的输运方程可以表示为

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i F)}{\partial x_i} = 0$$

(6)

式中: F ——流体的体积分数; t ——时间。

VOF 方法是一种两相流方法,在一个结构化有限差分网格中,水流和空气同时被模拟,每一个网格中,水流占的体积分数为 F ,若 $F=0$ 则表示该单元全部被空气填充,若 $0<F<1$,该单元为包含水流的自由表面。

2.2 边界条件

驻点压强边界条件被用于堰流模型的上游入口和下游出口,并设置了相应的上、下游水位。下游出口的设置水位应尽可能低以确保下游尾水不影响上游来流。由于堰流模型几何对称,对称面及顶部采用对称边界条件,水槽边壁及底部采用无滑移壁面边界条件。同时,为了缩短计算时间,添加了初始水深。

2.3 验证试验

为了验证数值模拟结果的有效性,物理模型试验同步进行。物理模型试验是在长为 10 m,宽为 0.3 m,高为 0.5 m 的自循环有机玻璃平底水槽中进行。上游水位由水位测针测得,流量由直角三角形薄壁堰测得,测针误差为 ± 0.1 mm。试验通过尾门调节水槽下游的尾水深度,使其维持在一个较低水位,防止尾水影响上游来流。折线堰模型距离水槽入口 4.0 m,其纵剖面由三部分组成(图 1,图中 h 为沿程水位):上游边坡 U、矩形堰顶 R、下游垂直边坡 V 表示。顺水流流向为 x 正向,铅垂方向为 y 向。童海鸿等^[2,10]在前人研究基础上发现:实用堰随着 δ/H 和 P/H 的变化可能向薄壁堰或者宽顶堰过渡,并根据先前的试验数据和资料得到折线型实用堰的判别标准为 $0.67 < \delta/H \leq 1.5 \sim 2.0$ 且 $0.5 \leq P/H < 3.0$ 。按照上述实用堰的定义标准,每个堰流模型选取的 P, δ, B 均为常数,取值分别为 24.0 cm、16.0 cm 和 30.0 cm,且堰与水槽同宽,无侧收缩;每个模型与 5 个堰顶总水头 8.0 cm、12.0 cm、16.0 cm、20.0 cm 和 24.0 cm 依次对应。验证试验选取下游边坡垂直、上游边坡系数 S_1 分别为 0 和 2.0 的折线堰。

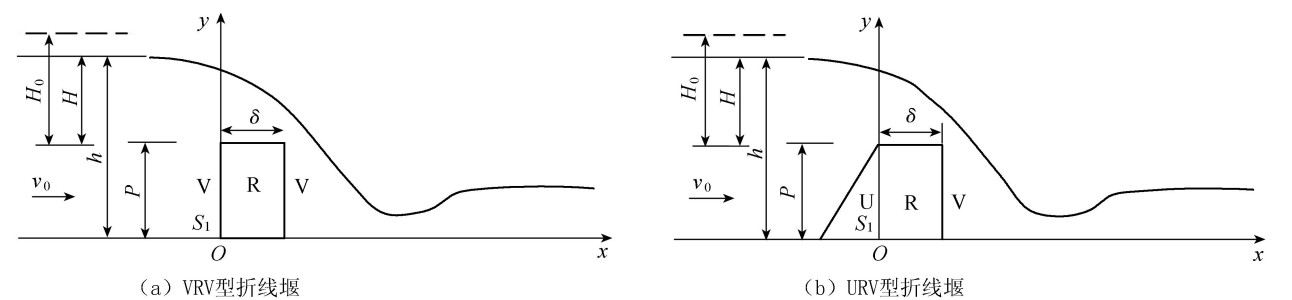


图 1 堰流模型的几何构型

Fig. 1 Definition sketch of the free flow over broken-line practical crested weir

2.4 数值模型

定义矩形水槽的长度为 10.0 m,宽度为 0.3 m。数值模型位于距离入口边界下游 4.0 m 的位置。整个计算区域由矩形元素组成的非均匀网格块覆盖。数值模型计算方案中 7 个被模拟的上游边坡系数分别为 0、0.3、0.5、0.8、1.0、1.5 和 2.0,每个边坡系数对应 5 个堰顶总水头 8.0 cm、12.0 cm、16.0 cm、20.0 cm 和

24.0 cm, 共计 35 组数据。表 1 列出了 4 组网格尺寸不同的水面线数值模拟结果, 统计了水面线测点的均方根误差(R_M)与平均绝对百分比误差(M_A), 用以检测数值模型的精度。

由表 1 可知, 方案 3 与方案 4 的差别很小, 可以忽略不计。最终选定方案 3 为网格划分方案, 在 x 、 y 、 z 坐标方向的网格数量分别为 632、18、50。计算区域的网格划分如图 2 所示。采用由 Yakhot 等^[24]提出的 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型进行紊流计算, 该模型针对折线堰自由堰流这种充分发展的紊流是有效的, 可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动, 与标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型相比, 在模拟水流分离区域时所需的试验常数较少。近壁区内的流动以及雷诺数较低的流动, 必须使用壁面函数法或低 $k-\varepsilon$ 模型来模拟^[25]。

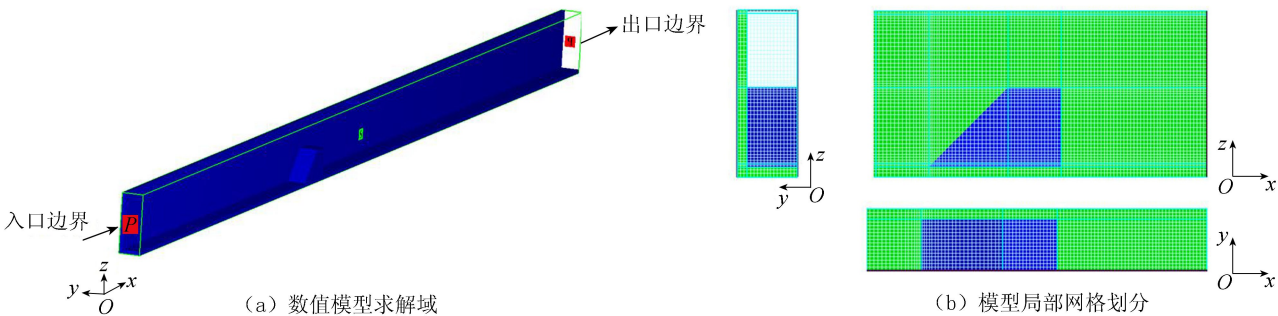


图 2 数值模型示意图
Fig. 2 Sketch of numerical model

3 结果与讨论

3.1 数值模型验证结果

$S_1=0$ 和 $S_1=2.0$ 的折线堰模型被用于验证数值模拟结果的有效性。自由泄流状态下, 将 2 种模型在不同堰顶总水头条件下所对应的流量系数以及水面线的数值模拟结果与实测结果进行对比, 如图 3 ~ 4 所示, 其中水面线原点 O 位于堰顶入口处, h 为沿程水位。图 4 显示: $S_1=2.0$, $\xi=0.6$ (ξ 表示相对堰顶总水头, $\xi=H_0/(P+\delta)$) 时的数学模型与物理模型的水面线基本一致, 且在堰下游背水面均出现了底滚回流区。表 2 为流量系数和水面线的均方根误差与平均绝对百分比误差。从数学模型与物理模型流场对比结果可见: Flow-3D 能够精确地预测折线堰过堰水流的自由表面以及计算与其直接相关的流量系数。

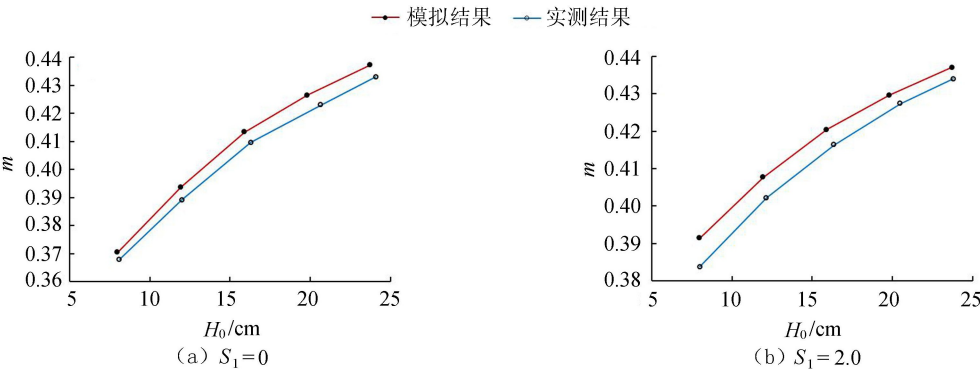


图 3 折线堰流量系数实测结果与数值模拟结果对比
Fig. 3 Comparisons of free discharge coefficients between the numerical simulation and the experiments

3.2 上游边坡系数对水面线的影响

7 种堰流模型(1 种 VRV 型和 6 种 URV 型)和 35 组数据被用来研究 S_1 对下游垂直的折线堰水面线和流量系数的影响。由图 5 可知: 水面线具有自模性, 水面线沿程下降, 可分为缓慢下降段和急剧下降段, 缓慢下降段水面线曲率近乎为 0, 接近水平线, 水流为缓流; 急剧下降段水流迅速地由缓流过渡到急流, 形成明显

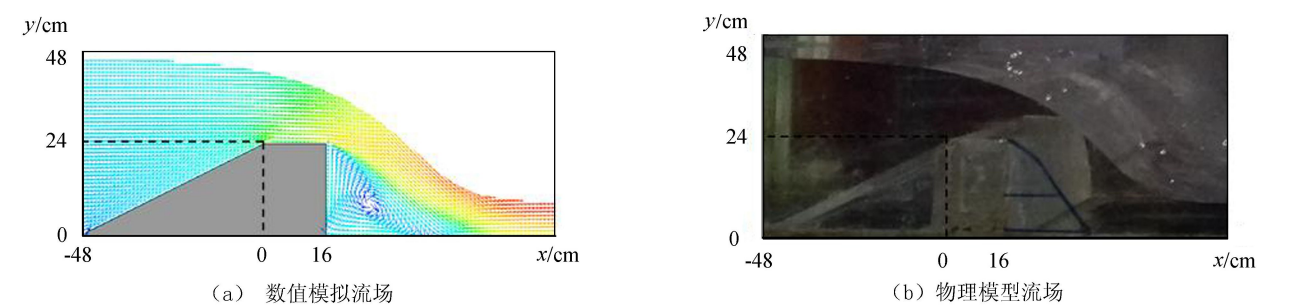


图 4 $S_1=2.0, \xi=0.6$ 时水面线实测结果与数值模拟结果对比

Fig. 4 Comparisons of free surface profiles between numerical simulation and experiment when $S_1=2.0$ and $\xi=0.6$

的水跌现象,并在 $x/\delta=0$ (堰顶入口处) 附近水面线下跌剧烈,这是因为此处的水流分离现象产生了较大的能量损失。此外,对于确定的上游边坡, H/δ 越小 (即下泄流量越小), 水面线曲率越大。图 6 为不同来流条件下上游边坡系数对应的沿程 Fr 变化,图中标注点为临界水深发生的位置。由图 6 可知,对于缓流段 ($Fr<1$, Fr 为弗汝德数), 同一 x/δ 位置处 H/δ 值越小 Fr 越小,这说明下泄流量较小时,水流所受的惯性力绝对值较小,在重力作用下,水面线更易弯曲,从而导致较大的水面线斜率;对于急流段 ($Fr>1$), 沿程水面线近似为倾斜的直线,且急流段水面线的斜率以及同一 x/δ 位置处的 Fr 随着 H/δ 的减小而逐渐增大,这是因为当 H/δ 值较小时,对于堰顶的急流段,惯性力与重力的比值变大,从而使水流具有保持缓流段高斜率水面线的趋势。由图 5、图 6 可以看出,不同来流条件下水面线间出现差异的位置随着上游边坡系数 S_1 的增加而向上游移动,且不同堰流模型临界流发生的平均位置也随之向上游移动。

表 2 流量系数和水面线的均方根误差与绝对百分比误差

Table 2 R_M and M_A for the discharge coefficient and the flow surface profile			
试验条件	统计对象	$R_M/\%$	$M_A/\%$
$S_1=0, \xi=0.2 \sim 0.6$	流量系数	0.37	0.91
$S_1=2.0, \xi=0.2 \sim 0.6$	流量系数	0.49	1.11
$S_1=0, \xi=0.6$	水面线	2.46	1.77
$S_1=2.0, \xi=0.6$	水面线	2.93	0.57

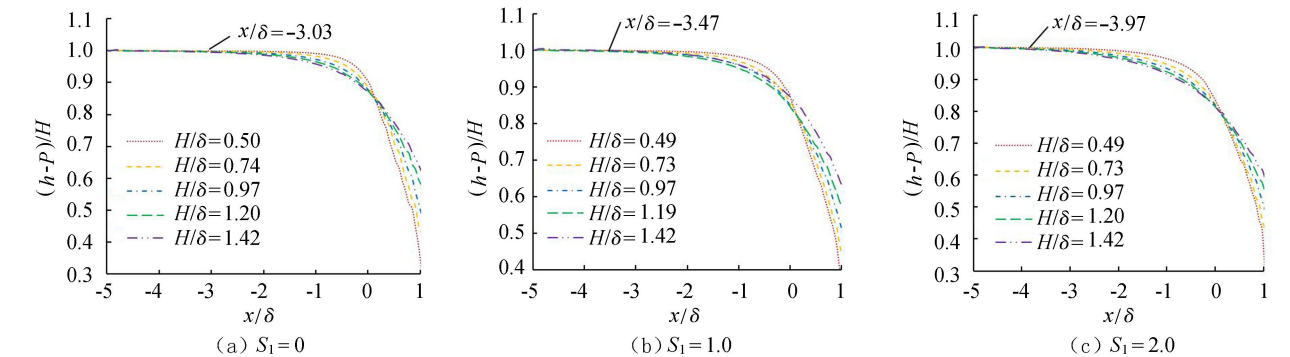


图 5 不同来流条件下上游边坡系数对应的水面线

Fig. 5 Free-surface patterns of varying slope coefficients in the upstream side under different inflow conditions

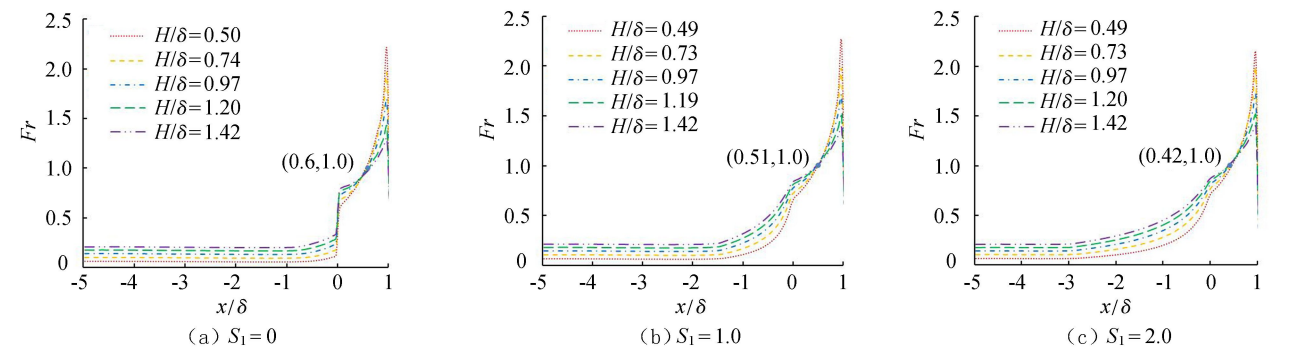


图 6 不同来流条件下上游边坡系数对应的沿程 Fr 变化

Fig. 6 Variation of Froude number in the flow direction corresponding to different slope coefficients of upstream side under different inflow conditions

3.3 上游边坡系数对流量系数的影响

由表3可知,对于确定的 S_1 , m 与 $\ln \xi$ 呈单调递增的线性关系(式(7))。由图7可知,对于确定的 S_1 ,流量系数随着 $\ln \xi$ 的增大而略有增加。 S_1 对 m 的影响程度却随着 $\ln \xi$ 的增大而逐渐减小。

$$m = \alpha \ln \xi + \beta$$
 (7)

式中: α 、 β ——由 S_1 决定的无量纲系数。

表3 不同上游边坡系数 S_1 对应的流量系数 m

Table 3 Discharge coefficient m corresponding to different slope coefficients S_1 of upstream side															
S_1	H_0/cm	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	m	S_1	H_0/cm	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	m	S_1	H_0/cm	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	m	S_1	H_0/cm	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	m
0.0	7.98	0.015	0.370	0.3	7.98	0.015	0.376	0.5	7.98	0.015	0.380	0.8	7.98	0.015	0.385
	11.94	0.029	0.394		11.94	0.029	0.400		11.95	0.029	0.403		11.94	0.030	0.406
	15.89	0.046	0.413		15.88	0.047	0.419		15.89	0.047	0.421		15.88	0.047	0.423
	19.82	0.067	0.426		19.81	0.067	0.431		19.83	0.068	0.432		19.81	0.068	0.435
	23.72	0.089	0.437		23.72	0.090	0.441		23.71	0.091	0.444		23.71	0.091	0.444
1.0	7.98	0.015	0.387	1.5	7.98	0.016	0.390	2.0	7.98	0.016	0.391				
	11.94	0.030	0.408		11.94	0.030	0.409		11.94	0.030	0.408				
	15.88	0.048	0.424		15.89	0.047	0.423		15.89	0.047	0.420				
	19.82	0.068	0.435		19.82	0.068	0.433		19.82	0.067	0.430				
	23.71	0.091	0.444		23.71	0.090	0.441		23.72	0.089	0.437				

由图8可知, α 与 S_1 呈良好的线性关系, β 与 S_1 呈良好的抛物线关系,相关系数 R^2 分别为0.994和0.997。综上所述,下游边坡垂直的折线堰在 S_1 变化的影响下拟合流量系数 m 的表达式为

$$m = [(-1.03S_1 + 6.27)\ln \xi + (-0.73S_1^2 + 0.85S_1 + 47.04)] \times 10^{-2}$$
 (8)

式(8)适用范围为 $0.0 \leq S_1 \leq 2.0$ 、 $0.67 \leq \delta/H \leq 2.0$ 、 $1.0 \leq P/H \leq 3.0$ 且 $-1.61 \leq \ln \xi \leq -0.51$ 。超出该范围的适用性要通过试验进行确定。

数值模拟得到的 m 与拟合得到的 m' 对比结果见图9,最大相对误差为0.28%,拟合结果良好。通过对式(8)进行分析,当 $\ln \xi$ 相同时,随着 S_1 的增加,流量系数 m' 先增大后减小,并在 $S_1 = 0.5822 - 0.7055 \ln \xi$ 时取得最大值。根据能量守恒定理,不同堰流模型流量系数的差异主要是由自由泄流过程中产生的沿程水头损失 h_f 和局部水头损失 h_j 造成。延长流程会导致 h_f 的增加,而减小水流分离区域则会到导致 h_j 的减少。对于VRV型折线堰,能量损失以 h_j 为主。 $\ln \xi$ 相同时,增加 S_1 延长了流程,减小了流线的弯曲程度以及水流分离区域,因此 h_f 增加, h_j 减小,但 h_f 的增加量小于 h_j 的减小量,所以流量系数先增加直到 $S_1 = 0.5822 - 0.7055 \ln \xi$ 。继续增大 S_1 , h_f 的增加量逐渐超过 h_j 的

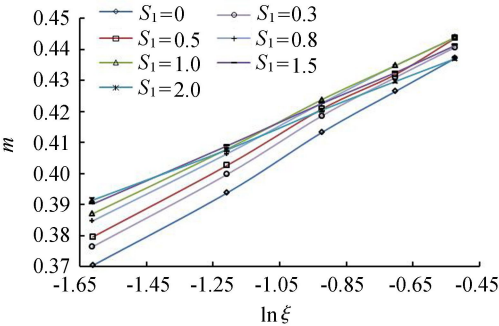


图7 不同 S_1 对应的 $\ln \xi$ 与 m 之间的关系

Fig.7 Relationship of discharge coefficient m and $\ln \xi$ under different range of S_1

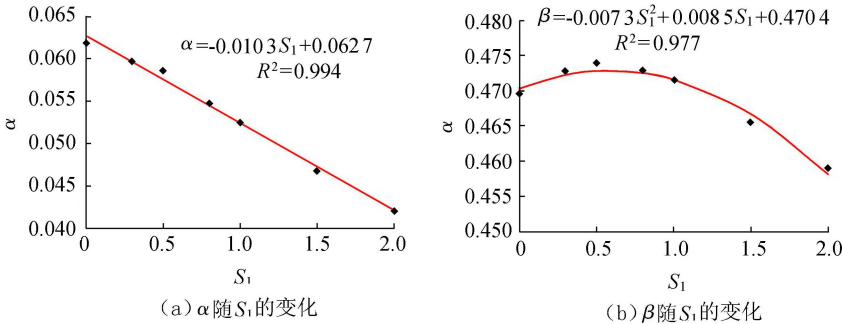


图8 α 、 β 随 S_1 的变化

Fig.8 Variation of non-dimensional parameters α and β with S_1

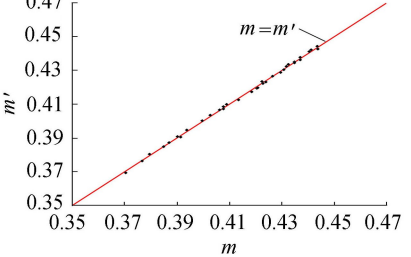


图9 流量系数数值模拟值 m 与公式拟合值 m' 间的偏差

Fig.9 Deviation between the fitting discharge coefficient m' and simulated discharge coefficient m

减小量,所以流量系数逐渐减小。随着 H_0 的增大,不同堰流模型所产生的水头损失差距在减小,因此上游边坡系数对流量系数的影响程度逐渐减小。

4 结 论

- a. 折线堰的沿程水面线逐渐下降,且 H/δ 值越大(即下泄流量越大),沿程水面线曲率越小,且随着 S_1 的增加,不同来流条件水面线间出现差异的位置逐渐向上游移动。
- b. 折线堰结构参数确定时,流量系数 m 随着 $\ln \xi$ 的增加而略有增大。
- c. 当 $\ln \xi$ 相同时,流量系数 m' 随着 S_1 的增加先增大后减小,并在 $S_1 = 0.5820 - 0.7055 \ln \xi$ 时达到最大值。
- d. 随着相对堰顶总水头的增加,上游边坡系数对流量系数的影响逐渐减小。
- e. 推导出了下游边坡直立、上游边坡系数变化的自由堰流流量系数公式,该公式反映出折线堰流量系数的大小不仅取决于水力条件,而且还取决于结构参数。与传统流量系数公式相比,引入了上游边坡系数这一变量,提高了公式的适用性,可为折线堰的工程设计提供了参考。

参考文献:

- [1] GOVINDA RAO N S, MURALIDHAR D. Discharge characteristics of weirs of finite-crest width[J]. La Houille Blanche, 1963, 5(5): 537-545.
- [2] 童海鸿,李梦成,丁新求. 低堰体型与泄流能力关系的初步研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(4): 25-28. (TONG Haihong, LI Mengcheng, DING Xinqiu. Relation between low weir shape and discharge capacity[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(4): 25-28. (in Chinese))
- [3] 李炜. 水力计算手册[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [4] 李家星,赵振兴. 水力学[M]. 南京:河海大学出版社, 2001.
- [5] INOZEMTSEV Y P. Cavitation destruction of concrete and protective facings under natural conditions[J]. Power Technology and Engineering, 1969, 3(1): 35-42.
- [6] 童海鸿,兰芙蓉. 堰高对低堰泄流能力影响的分析[J]. 人民长江, 2002(11):20-21. (TONG Haihong, LAN Furong. Analysis of the effect of weir height on discharge capacity of low weirs[J]. Yangtze River, 2002(11): 20-21. (in Chinese))
- [7] RAMAMURTHY A, TIM U, RAO M. Characteristics of square-edged and round-nosed broad-crested weirs[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1988, 114(1): 61-73.
- [8] BOS M G. Discharge measurement structures; working group on small hydraulic structures[M]. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1978.
- [9] 基谢列夫. 水力学流体力学原理[M]. 北京:水利电力出版社, 1983.
- [10] 童海鸿,艾克明,丁新求. 折线型实用堰过流能力研究[J]. 中国农村水利水电, 2002,19(2):7-10. (TONG Haihong, AI Keming, DING Xinqiu. Discharge capacity of broken-line practical weir[J]. China Rural Water and Hydropower, 2002,19(2): 7-10. (in Chinese))
- [11] SINGER J. Square-edged broad-crested weir as a flow measurement device[J]. Water and Water Engineering, 1964, 68(6): 229-235.
- [12] FARHOUDI J, SHAH ALAMI H. Slope effect on discharge efficiency in rectangular broad crested weir with sloped upstream face [J]. International Journal of Civil Engineering, 2005, 3(1): 58-65.
- [13] AZIMI A H, RAJARATNAM N. Discharge characteristics of weirs of finite crest Length[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2009, 139(1): 1081-1085.
- [14] GOODARZI E, FARHOUDI J, SHOKRI N. Flow characteristics of rectangular broad-crested weirs with sloped upstream face [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2012, 60(2): 87-100.
- [15] 张绍芳. 低堰溢流能力计算[J]. 水利学报, 1982,13(11):53-57. (ZHANG Shaofang. Calculation on overflow capacity of low weirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982,13(11): 53-57. (in Chinese))
- [16] 武汉水利电力学院水力学教研室. 水力计算手册[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1983.
- [17] HAUN S, OLSEN N R B, FEURICH R. Numerical modeling of flow over trapezoidal broad-crested weir[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2011, 5(3): 397-405.
- [18] SARGISON J E, PERCY A. Hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes[J]. Journal of Irrigation and Drainage

Engineering-ASCE, 2009, 135(1): 115-118.

[19] PAIK J, LEE N J. Numerical modeling of free surface flow over a broad-crested rectangular weir[J]. Journal of Korea Water Resources Association, 2015, 48(4): 281-290.

[20] VACCINE D V, 王世夏. 模型缩尺和流量系数[J]. 水利水电科技进展, 1981, 1(2): 37-44. (VACCINE D V, WANG Shixia. Model scale and discharge coefficient[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1981, 1(2): 37-44. (in Chinese))

[21] ISAACS L T. Effects of laminar boundary layer on a model broad-crested weir[J]. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1981, 83: 1-20.

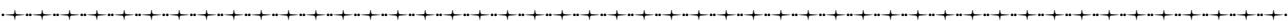
[22] RANGARAJU K G, SRIVASTAVA R, POREY P D. Scale effects in modelling flow over broad-crested weirs[J]. Irrigation and Power, 1990, 47: 101-106.

[23] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.

[24] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence. I. basic theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3-51.

[25] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(收稿日期: 2017-06-27 编辑: 刘晓艳)



• 简讯 •

第十届全国土动力学学术会议将在南京市召开

随着城市化进程加快和“一带一路”战略的实施,土动力与岩土地震工程问题已成为土木工程防灾减灾研究领域最具挑战性的课题。为给土动力学与岩土地震工程的科技工作者提供交流的机会,第十届全国土动力学学术会议将于2018年11月2—4日在六朝古都南京市召开。本次会议是继1980年12月6—12日在安徽合肥召开的“土的动力特性学术讨论会”后从事土动力学与岩土地震工程的科技人员和工程人员的又一次盛会,在汶川特大地震10周年之际的2018年召开“第十届全国土动力学学术会议”,将是一次具有历史意义的学术盛会。

会议主题与内容:围绕“一带一路”战略、“建设海洋强国”战略和“西部大开发”战略中的重大工程灾害灾前预防与综合防范,重点研讨防灾减灾救灾工作实施“两个坚持、三个转变”新理念中遇到的土动力学与岩土地震工程领域的前沿科学与关键技术。征文专题包括土的动力特性与本构关系、土与结构动力相互作用、土动力学数值与物理模拟研究等。

(本刊编辑部供稿)