

WES 型复合堰型划分及泄流能力研究

袁群^{1,3}, 贺懋茂^{2,3}, 赵玉良^{1,3}, 李松平^{1,3}

(1. 河南省水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 华北水利水电学院, 郑州 450008;

3. 河南省水利工程安全技术重点实验室, 郑州 450003)

摘要: WES 型复合堰是由 WES 堰的堰顶增加一平段衍变而成。通过改变堰顶厚度以及上游堰高形成一系列不同体型的 WES 型复合堰, 由过堰水流流态和流量系数的变化规律, 探讨了将 WES 型复合堰划分为 WES 型复合实用堰与 WES 型复合宽顶堰, 及将 WES 型复合实用堰划分为高堰与低堰的划分标准, 并在高、低堰的划分标准中考虑了堰顶厚度的影响。此外, 按堰型分类给出了设计水位下流量系数的拟合公式, 为进一步研究奠定了基础。

关键词: WES 型复合堰; 流量系数; 实用堰; 宽顶堰; 高堰; 低堰

中图分类号: TV135.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2013)05-0051-04

1 研究背景

WES 堰是由美国陆军工程师水道试验站提出的一种实用堰。与克-奥堰相比, WES 堰能以较瘦小的体型得到较大的流量系数, 且堰面压强分布合理, 以设计水头运行时无负压^[1], 同时堰面曲线以连续方程的形式给出, 便于设计与施工, 具有缩短工期、节省投资等优点。WES I 型堰铅直的上游堰面与堰顶之间原为 2 段圆弧相连, 1970 年根据新的试验成果改为 3 段圆弧相连^[2], 与 2 段圆弧相比, 3 段圆弧的改进使得过流条件更好, 堰面压强分布更合理, 因此 WES 堰的此种改进很快就得到认可, 并大量应用于水利工程中。关于标准 WES 堰的流量系数的研究成果较多, 美国陆军工程兵团水道试验站经过系统试验给出了 WES 堰的流量系数图表, 国内外一些学者对 WES 堰泄洪能力进行了深入研究^[3], 并且给出了一些便于使用的经验公式。

近年来, 在新建或对原有工程的改造过程中, WES 堰或由 WES 堰衍变出来的堰型仍有广泛的应用。如鸭河口水库是河南境内一座大 I 型水利枢纽工程, 2010 年对其 1 号溢洪道进行除险加固^[4], 为节约投资, 将已有的克-奥堰作为施工围堰, 并将老堰的堰顶以上部分拆除, 在紧邻老堰的下游侧修建与老堰高程一致的 WES 新堰, 两堰之间填平至与堰顶同高形成一种新的复合堰。此种复合堰实质上是由 WES 堰在顺水流方向拓宽堰顶衍变而来的一种

WES 型复合堰型(见图 1), 它兼具实用堰与宽顶堰的外形特征。因此目前通用的划分实用堰与宽顶堰的标准, 及实用堰中划分高、低堰的标准是否仍能适用, 是关系到这种新型复合堰型过流能力确定, 及能否在实际工程中推广应用的一个关键问题。为此以不同的堰顶宽度和上游堰高进行组合得到一系列 WES 型复合堰, 试验研究它们流量系数的变化规律、过流流态的演变规律, 探讨 WES 型复合堰的堰型划分标准及高、低堰的划分标准。由于 WES 型复合堰不是标准堰型, 如再用以往的图表或经验公式来获取流量系数就会有较大的误差, 不能满足应用需要, 为此通过试验研究按堰型分别给出了设计水头下适用于 WES 型复合堰的流量系数经验公式, 以便推广应用。

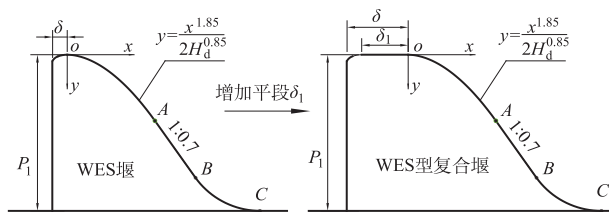


图 1 WES 型复合堰剖面图

Fig.1 Profile of WES compound weir

2 试验设计

2.1 试验模型

试验是在长 24 m, 宽和高均为 0.8 m 的玻璃水槽中进行, 水槽底板为水泥砂浆抹面的混凝土垫层。

WES 型复合堰模型与玻璃水槽同宽,设计水头 H_d 为 10 cm,用有机玻璃制作并用细砂纸打磨光滑,糙率 n 在 0.007 ~ 0.008 之间。该模型堰上游底板为连接在铅直堰壁上 130 cm 长的有机玻璃板,为设计水头的 13 倍,宽度与堰相同;上游堰壁铅直(见图 1),上游圆角进水口为 WES 堰的三圆弧曲线,堰顶高 30 cm,下游堰面为 WES 曲线型,其曲线方程为 $y = x^{1.85}/(2H_d^{0.85})$;下游底板即玻璃水槽水泥底板。模型堰安装时利用经纬仪定线,水准仪操平,控制误差不大于 0.3 mm。堰顶通过替换不同宽度的有机玻璃板可实现堰顶厚度 δ 的变化,上游通过抬升有机玻璃底板可实现上游堰高 P_1 的变化。

试验选取 12 组不同的堰顶平段厚度 δ_1 和 8 组不同的上游堰高 P_1 ,以形成不同的体型组合。堰顶平段厚度 δ_1 及其对应的堰顶厚度 δ 的设计值见表 1,8 组不同的上游堰高 P_1 的设计值分别为 2, 3.3, 6.7, 10, 13.3, 15, 20, 30 cm。

表 1 12 组不同的堰顶厚度设计值

Table 1 Twelve designs of weir crest thickness cm			
平段厚度 δ_1	堰顶厚度 δ	平段厚度 δ_1	堰顶厚度 δ
3.00	5.82	12.00	14.82
5.00	7.82	14.00	16.82
6.70	9.52	15.00	17.82
7.50	10.32	20.00	22.82
10.00	12.82	25.00	27.82
11.00	13.82	30.00	32.82

2.2 试验方法

试验时,WES 型复合堰下游堰高保持 30 cm 不变,不考虑侧收缩及下游淹没,则 WES 型复合堰的流量计算公式为

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{1.5} \quad (1)$$

式中: Q 为流量 (m^3/s); H 为不包括行进流速的堰上水头 (m); b 为堰宽 (m); g 为重力加速度 (m^2/s); m_0 为综合流量系数。

流量 Q 可以通过上游矩形量水堰测得,堰上水头 H 可根据测压管读数测得,则综合流量系数 m_0 可由公式(1)求出。

试验时,在堰上水头 H 保持为设计水头 10 cm 不变的情况下(即 $H = H_d$),进行各体型组合下(堰顶厚度 δ 取表 1 中全部 12 组设计值,上游堰高 P_1 取全部 8 组设计值)的放水试验,然后也同时改变堰上水头 H (分别取 2, 4, 6, 8, 12, 13 cm),进行不同体型组合下(堰顶厚度 δ 取表 1 中 5 组设计值: 7.82, 12.82, 17.82, 22.82, 27.82 cm; 上游堰高 P_1 取全部 8 组设计值)的放水试验,记录水位、流态等状况。根据试验结果计算得到的综合流量系数及过

流流态等水力特性的变化情况,探讨将 WES 型复合堰划分为 WES 型复合实用堰或 WES 型复合宽顶堰的划分标准;并根据高堰和低堰的判别标准,探讨 WES 型复合堰高堰和低堰的划分;最后根据划分结果按堰型分类给出设计水头下 WES 型复合堰流量系数计算的经验公式。

3 堰型划分

3.1 WES 型复合实用堰和 WES 型复合宽顶堰的划分

工程上通常按堰壁厚度与堰上水头比值 δ/H 的大小,把堰分为薄壁堰 ($\delta/H < 0.67$)、实用堰 ($0.67 < \delta/H < 2.5$) 与宽顶堰 ($2.5 < \delta/H < 10$),但实质上区分薄壁堰、实用堰和宽顶堰的重要特征是过堰水流的水力特性,即过流流态与流量系数。本文研究的 WES 型复合堰是由 WES 堰拓宽堰顶衍变而成,不存在 WES 型复合薄壁堰的情况,当堰顶平段厚度 δ_1 增加时,堰型只能由 WES 型复合实用堰变化到 WES 型复合宽顶堰,因此本文仅探讨 WES 型复合实用堰与 WES 型复合宽顶堰的划分标准。

由试验得到的各种 P_1/H_d 与 δ/H 对应下的综合流量系数(见图 2)可以看出:当 $\delta/H < 2$ 时,随 δ/H 的增加,综合流量系数 m_0 减小趋势较快,变化率较大;当 $\delta/H > 2$ 时,随 δ/H 的增加综合流量系数 m_0 的减小趋势变缓,变化率较小;即 $\delta/H = 2$ 时,是过堰综合流量系数 m_0 发生明显变化的关节点。在各种相对堰高 P_1/H_d 下,WES 型复合堰的综合流量系数随着 δ/H 的增加不断减小的过程,对应了 WES 型复合堰由实用堰变化到宽顶堰的过程。此外,当 P_1/H_d 较大时,可以发现各 δ/H 所对应的综合流量系数十分接近,这反应出在高堰范围内,流量系数不再随堰高而发生较大变化的特性。

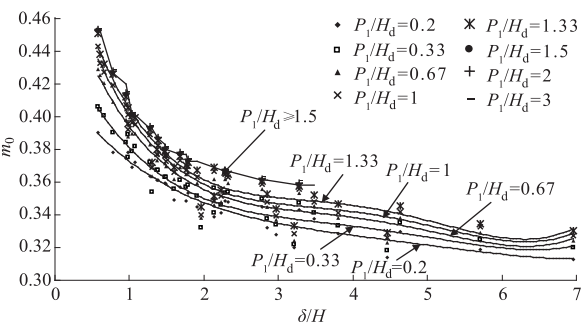


图 2 δ/H 与 m_0 的变化关系

Fig.2 Relationship between δ/H and m_0

观测过堰水流水面线可以发现(见图 3):在 $\delta/H < 2$ 时,水面线是一条光滑的抛物线,过堰水流

主要是在重力的作用下泄向下游,堰顶对过流无明显顶托作用,过堰水流流态与实用堰的较为相像;当 $\delta/H \geq 2$ 时,水面线在堰的进口处和堰顶末端出现两次明显的跌落,堰顶段对过流的顶托作用十分明显,有一小段水流与堰顶近似平行,过堰水流流态更符合宽顶堰的特征。

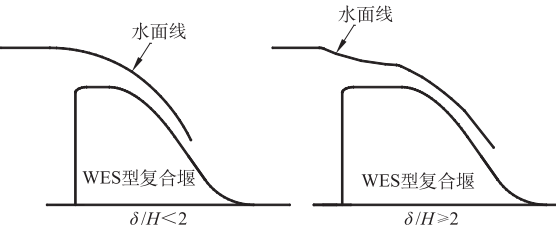


图 3 WES 型复合堰的过流流态示意图
Fig. 3 Sketch of flow regime of WES compound weir

综合流量系数及过堰流态的分析结果认为,当 $\delta/H < 2$ 时,WES 型复合堰划分为 WES 型复合实用堰,当 $\delta/H \geq 2$ 时,WES 型复合堰划分为 WES 型复合宽顶堰。

3.2 高、低堰的划分

目前关于高、低堰的判别标准有 2 种提法:
①当堰高增大到一定值,堰前流速很小,流速水头在总水头中所占比例很小可以忽略不计,此时为高堰;
②当堰高增大到一定值,影响泄流能力的各水力要素不再随堰高改变而变化,此时为高堰^[5]。流量系数是反映泄流能力最主要的水力要素,本文选用第 2 种判别标准,以流量系数的变化情况作为依据探讨高、低堰的划分。

以往关于 WES 堰高、低堰划分的研究^[6-7]表明,当上游相对堰高 $P_1/H_d \geq 1.33$ 时,若堰高继续增加,过堰水舌的轨迹不再发生明显变化,流量系数也不再随堰高 P_1 而变,因此将之作为高、低堰的划分界限。这种划分是针对特定堰型进行的,对于既定设计水头 H_d ,WES 堰剖面曲线是固定的,因此这种划分是针对标准 WES 堰且只考虑了上游堰高 P_1 的变化影响。对于本文研究的由 WES 堰衍变而来的 WES 型复合堰,除上游堰高 P_1 外,堰顶厚度 δ 也是可变的,使堰的体型变化增加了新的影响因素。为了研究高、低堰的界限与 δ 的变化有无关系,选取堰上水头 $H = 10$ cm 时各种体型组合下的流量系数变化情况进行分析。由试验结果发现:随着相对堰顶厚度 δ/H_d 的变化,以上游相对堰高表示的高、低堰界限值 $(P_1/H_d)_{sk}$ 也是变化的。以堰上水头等于设计水头即 $H = H_d = 10$ cm (此时, $m_0 = m_{0d}$) 为例如图 4 所示:当 δ/H_d 较小(如 $\delta/H_d = 0.582$) 时, P_1/H_d 增大到 1.5 后,WES 型复合堰的综合流量系数基本稳

定,不再随 P_1/H_d 的增加而变化。这符合高堰的判别标准,认为此时进入了高堰范围,则高、低堰的界限值 $(P_1/H_d)_{sk} = 1.5$ 。随着 δ/H_d 的增大,综合流量系数基本稳定的拐点所对应的 P_1/H_d 值逐渐增大。当 $\delta/H_d = 1.782$ 时, P_1/H_d 要增大到 2 后综合流量系数才保持稳定,此时高、低堰的界限值 $(P_1/H_d)_{sk} = 2$ 。可见,在试验范围内,作为高、低堰界限的 $(P_1/H_d)_{sk}$ 值是随着 δ/H_d 的增加而变大的。由此,我们认为 WES 型复合堰高、低堰的界限不仅与上游相对堰高 P_1/H_d 有关,同时也受相对堰顶厚度 δ/H_d 的影响。根据试验结果,给出将 WES 型复合实用堰划分为高、低堰界限值的拟合公式为

$$(P_1/H_d)_{sk} = 1.23e^{0.27(\delta/H_d)} \quad (2)$$

公式的适用范围为 $0.282 \leq \delta/H_d < 2$ (当 $\delta/H_d = 0.282$ 时,即为标准 WES 实用堰,此时 $(P_1/H_d)_{sk} = 1.33$),在此范围内满足 $P_1/H_d \geq (P_1/H_d)_{sk}$ 的为高堰,否则为低堰。

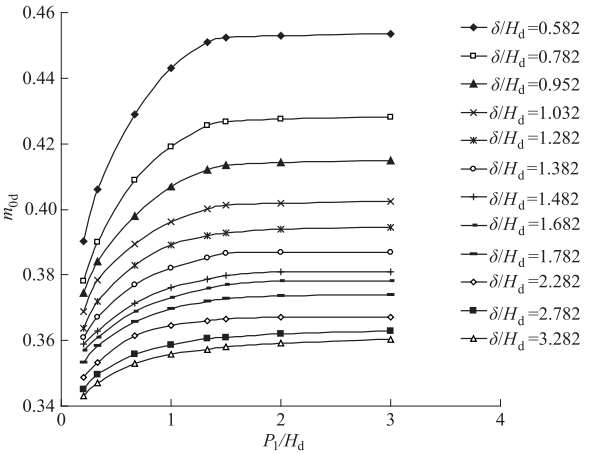


图 4 P_1/H_d 与 m_{0d} 之间的变化关系
Fig. 4 Relationship between P_1/H_d and m_{0d}

4 流量系数

标准堰型在实际工程中的应用较多,其流量系数相关的研究成果也较多。如克 - 奥堰的流量系数^[8] 约为 0.49,WES 高堰在设计水头下的流量系数为 0.502,宽顶堰的流量系数^[9] 理论最高值为 0.385 等。以往对于流量系数的研究都是针对某一特定堰型进行的,一些流量系数计算公式及相关成果也是由既定堰型得出的。但实际工程中受多种因素的影响,堰型很多情况下是在标准堰型的基础上经过改动衍变而成,由于堰型的改变原有标准堰的计算公式或图表已不能很好地满足应用的需求,国内一些学者已开始对实际工程中应用较多的非标准堰的泄流能力进行试验研究。本文对于 WES 型复合堰流

量系数的研究,适用于由 WES 堰通过改变上游堰高或改变堰顶厚度衍变而来的新体型。

以往针对特定堰型进行的流量系数的研究,只是将堰顶厚度做为一个范围值来考虑(如将堰型划定为实用堰时,在此范围内就不再考虑 δ/H 的影响了),其综合流量系数可表示为

$$m_0 = f(H/H_d, P_1/H_d) \quad (3)$$

而由对 WES 型复合堰的研究分析可知,堰顶厚度这一因素对 WES 型复合堰的流量系数显然是有影响的,因此, WES 型复合堰的综合流量系数更合理的表示应该为

$$m_0 = f(H/H_d, P_1/H_d, \delta/H) \quad (4)$$

由于本文试验数据的限制,这里只给出了设计水头下($H = H_d$) WES 型复合堰综合流量系数的拟合公式:

WES 型复合实用堰(低堰)

$$m_{0d} = (0.463\,9 - 0.057\delta/H_d)(P_1/H_d)^{0.043\,5}; \quad (5)$$

WES 型复合实用堰(高堰)

$$m_{0d} = 0.467\,2 - 0.061\,6\delta/H_d; \quad (6)$$

WES 型复合宽顶堰

$$m_{0d} = (0.365\,7 - 0.003\,8\delta/H_d)(P_1/H_d)^{0.021\,3} \quad (7)$$

公式(5)的适用范围为 $0.282 \leq \delta/H_d < 2, P_1/H_d < (P_1/H_d)_{sk}$; 公式(6)的适用范围为 $0.282 \leq \delta/H_d < 2, P_1/H_d \geq (P_1/H_d)_{sk}$; 公式(7)的适用范围为 $2 \leq \delta/H_d \leq 3, 0 < P_1/H_d \leq 3$ 。

由式(5)、(6)、(7)计算的综合流量系数与试验实际测量的数值相对误差最大值分别为 -3.3% , 2.8% , -2.1% , 均不超过 $\pm 5\%$, 满足精度要求。

5 结 语

WES 型复合堰有许多优点,在对溢洪道的除险加固工程中,可以在老堰的基础上将堰顶及以上部分拆除,利用部分堰体改造成 WES 型复合堰,这样在满足防洪要求的条件下有利于减小工程量,节约成本。对于闸墩,将 WES 堰的堰顶增加一平段形成 WES 型复合堰有利于检修闸门及闸门底止水结构等的布置。本文通过对 WES 型复合堰的堰型划分研究,得到了 WES 型复合堰体型与流量系数之间的变化规律,探讨了 WES 型复合实用堰和 WES 型复合宽顶堰的划分标准,并在高、低堰的划分标准中首次引入了堰顶厚度参数,深化了对 WES 型复合堰水力特性的认识。此外,按堰型分类给出的设计水头

下 WES 型复合堰流量系数拟合公式,对实际工程有一定参考价值,同时为 WES 型复合堰流量系数的进一步研究积累了经验。

参考文献:

- [1] 吴持恭. 水力学[M]. 北京:高等教育出版社,2008:295-315. (WU Chi-gong. Hydraulics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008:295-315. (in Chinese))
- [2] 沈长松,王世夏,林益才,等. 水工建筑物[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008:77-82. (SHEN Chang-song, WANG Shi-xia, LIN Yi-cai, et al. Hydraulic Structures [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydro-power Press, 2008:77-82. (in Chinese))
- [3] 任西平,李欢,刘善均. 从多角度对 WES 实用堰泄洪能力的深入分析[J]. 四川水力发电,2009,(6):94-97. (REN Xi-ping, LI Huan, LIU Shan-jun. Analysis from the Multiple Perspectives of WES Weir Release Flood Waters Ability [J]. Sichuan Water Power, 2009, (6):94-97. (in Chinese))
- [4] 李西平. 鸭河口水库溢洪道泄流能力研究[J]. 人民长江,2010,(9):92-94. (LI Xi-ping. Study on Spillway Discharge Capacity of Yahekou Reservoir [J]. Yangtze River, 2010,(9):92-94. (in Chinese))
- [5] 马成. 实用堰的水力特性的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2007:11-13. (MA Cheng. Study on Practical Weir Hydraulic Characteristics [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007:11-13. (in Chinese))
- [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 Hai-hong, LAN Fu-rong. Analysis of the Influence of Weir Height on Discharge Capacity of Low Weir [J]. Yangtze River, 2002,(11):20-21. (in Chinese))
- [7] 张绍芳. 实用堰流量系数计算[J]. 水文,1994,(1):18-24. (ZHANG Shao-fang. Flow Coefficient Calculation of Practical Weir [J]. Hydrology, 1994,(1):18-24. (in Chinese))
- [8] 武汉水利电力学院水力学教研室. 水力计算手册[M]. 北京:水利电力出版社,1983:133-137. (Wuhan Institute of Water Conservancy and Electric Power Hydraulics Laboratory. Hydraulic Computation Handbook [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983:133-137. (in Chinese))
- [9] 田间,李贵清,季安. 无坎宽顶堰堰流量系数的探讨[J]. 水利水电科技进展,2003,(3):34-35. (TIAN Jian, LI Gui-qing, JI An. The Discussion of the Discharge Coefficient for Stepless, Broad-crest Weirs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003,(3):34-35. (in Chinese))