

水利水运工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

琴键堰泄流能力影响因素与计算分析研究

李艳富, 韩昌海, 李子祥, 韩康, 余凯文

Calculation analysis on the discharge capacity of Piano Key weir and relative influencing factors

LI Yanfu, HAN Changhai, LI Zixiang, HAN Kang, YU Kaiwen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20211111001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

胖头泡蓄滞洪区老龙口分洪闸泄洪能力分析

Analysis of flood discharging capacity of Laolongkou flood-diversion sluice at Pangtoupao flood retarding basin
水利水运工程学报. 2019(3): 51 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.007>

CES模型计算复式河槽过流能力及方法对比

Comparison between CES model and other models for calculating discharge capacity of compound river channel
水利水运工程学报. 2019(3): 60 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.008>

枢纽不同泄流方式的水流恢复距离研究

Study on flow recovery distance under different discharge conditions of hydro-power station
水利水运工程学报. 2020(2): 79 <https://doi.org/10.12170/20190211002>

2000—2018年中国水库溃坝规律分析与对策

Analysis of dam failure trend of China from 2000 to 2018 and improvement suggestions
水利水运工程学报. 2021(5): 101 <https://doi.org/10.12170/20201119001>

基于改进小波阈值-EMD算法的高拱坝结构振动响应分析

Flow-induced vibration response analysis of high arch dam discharge structure based on improved wavelet threshold-EMD algorithm
水利水运工程学报. 2019(4): 83 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.012>

混凝土剪切强度影响因素敏感性分析

Sensitivity analysis of influencing factors on concrete shear strength
水利水运工程学报. 2019(3): 112 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.014>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20211111001

李艳富, 韩昌海, 李子祥, 等. 琴键堰泄流能力影响因素与计算分析研究 [J]. 水利水运工程学报, 2022(6): 16-24. (LI Yanfu, HAN Changhai, LI Zixiang, et al. Calculation analysis on the discharge capacity of Piano Key weir and relative influencing factors[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(6): 16-24. (in Chinese))

琴键堰泄流能力影响因素与计算分析研究

李艳富, 韩昌海, 李子祥, 韩 康, 余凯文

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 近年来特大洪水和超标洪水频繁发生, 已建水利工程泄流能力不足问题日益突出。琴键堰在适当低水头条件下具有高效泄流效率。归纳了琴键堰主要结构参数对其泄流能力的影响及最佳取值, 总结了琴键堰流态对泄流能力的影响, 分析了琴键堰发生低水头行为的条件参数。通过对比现有琴键堰泄流能力估算公式, 并结合国内外已有试验数据, 采用遗传算法拟合推导了基于溢流堰轴线长度 L 、堰宽 W 、堰长 B 、堰高 P 、进出水宫室宽度比 W_1/W_0 及上下游倒悬长度比 B_0/B_1 流量系数计算式, 整体误差小于 6%。该式计算简单, 适用于琴键堰整体泄流能力估算, 可根据实际需求选取合适的估算公式。琴键堰主要结构参数的最佳取值及泄流能力的计算方法可为超标洪水条件下泄流建筑物设计或改建提供估算依据。

关键词: 超标洪水; 泄水建筑物; 琴键堰; 泄流能力; 流量系数

中图分类号: TV132

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)06-0016-09

随着全球气候变化加剧, 极端天气出现频率增大, 致使洪涝灾害严重, 尤其是特大洪水和超标洪水频繁发生。为了解决新形势下超标洪水导致已有水利工程泄流能力不足的问题^[1], 在原有溢洪道基础上进行升级改造是较为常用的工程措施^[2]。近年来国际上应对特大洪水和超标洪水, 将普通溢流堰设计成迷宫堰, 其轴线在平面上呈折线型^[3], 在同等溢流宽度条件下, 溢流前缘长度比直线堰要长得多。此后在迷宫堰的基础上采用倾斜的底板取代垂直墙, 发明了琴键堰(Piano-Key Weir, 简称 PKW), 溢流堰轴线被拉长, 形成多个首尾相连的侧堰, 与出水宫室上游溢流堰和进水宫室下游溢流堰共同泄水, 增大了溢流堰前缘长度^[4]。琴键堰大幅度提升了溢流堰过流能力^[5-6], 特别在适当低水头条件下, 琴键堰泄流效率为直线堰的 4~5 倍^[7]。近年来世界上已修建了 30 余座琴键堰, 但我国琴键堰工程比较少见。我国存在大量窄河谷、大泄流量要求的水利工程, 在面对超标洪水时存在较大风险, 琴键堰具有较为广泛的应用前景。本文对琴键堰泄流能力影响因素和预测方法开展相关研究, 为超标洪水条件下泄流建筑物设计或改建提供估算依据。

1 琴键堰简介

琴键堰上下游结构悬伸, 改变了宫室底板斜率, 呈现顶部宽、底部窄、平面呈矩形, 像黑白交错的钢琴键, 因此称为琴键堰, 典型的琴键堰体型见图 1。琴键堰结构设计参数包括堰宽 W 、堰高 P 、堰长 B 、溢流堰轴线长度 L 、出水宫室宽度 W_0 、进水宫室宽度 W_1 、上游倒悬长度 B_0 、下游倒悬长度 B_1 、堰壁厚度 T_s 等。

琴键堰分为上下游均有倒悬的 A 型和上游单侧倒悬的 B 型。对于低水头, B 型琴键堰泄流能力大于

收稿日期: 2021-11-11

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y121005)

作者简介: 李艳富(1983—), 女, 黑龙江鹤岗人, 高级工程师, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: yfli@nhri.cn 通信作者: 韩昌海(E-mail: chhan@nhri.cn)

A型琴键堰^[8],但是随着水头的增加其泄流能力迅速降低^[7]。近年来,大多数的琴键堰设计体型是上下对称悬垂结构,即A型琴键堰($B_o/B_i=1$)。

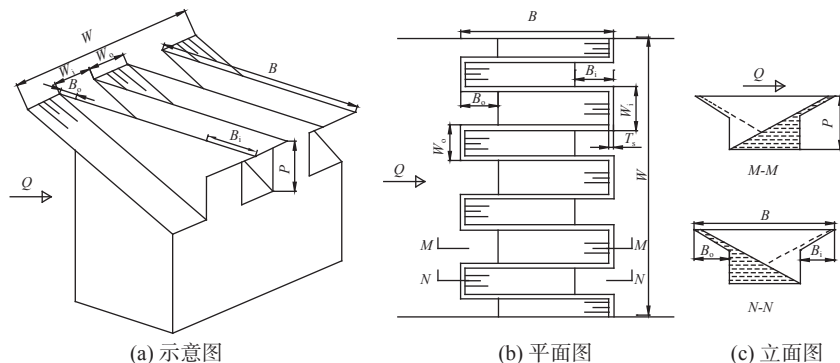


图1 典型琴键堰结构图

Fig. 1 Typical Piano Key weir structure view

琴键堰宫数越多,水流之间的干扰越大,会降低琴键堰泄流效率,设计中应综合考虑泄流能力和工程造价^[7],研究表明琴键堰宫数取5~6最佳^[6]。目前试验研究中各结构参数合理范围是: $H/P>0.1$, $2.5<L/W<8.5$, $0<W_i/W_o<2.45$, $1<B/P<6$,原型已建工程相关参数也在上述范围内^[9]。文献[6]提出了一种提升3倍泄流能力的琴键堰布置型式。

2 琴键堰结构参数对泄流能力的影响

近年来国内外学者研究了琴键堰结构参数对泄流能力的影响。溢流堰轴线长度 L 、堰高 P 、堰长 B 、堰宽 W 、进出口宽度比 W_i/W_o 及上下游倒悬比 B_o/B_i 等是琴键堰泄流能力的主要影响因素^[7,10]。

溢流堰轴线长度与堰宽之比是相对溢流前缘长度放大比 L/W ,是控制泄流能力的主要参数。当 $L/W=5$ 时,琴键堰的泄流能力和其工程造价能达到最佳平衡^[6]。当堰上水头恒定时,泄流能力随堰高 P 增加而增大^[11]。琴键堰底坡斜率可提升泄流能力,当 H/P 较大时,琴键堰底坡斜率由2:1增加到3:2可以提升泄流能力20%^[12]。琴键堰宽度比 W_i/W_o 也是影响泄流能力的关键参数,当 W_i/W_o 由1.00增加到1.20时,泄流效率提升5%^[13]。当 $W_i/W_o=1.20\sim 1.25$,琴键堰泄流效率最佳^[6,12,14]。琴键堰倒悬比 $B_o/B_i>1$ 时,在堰上水头不变条件下, B_o/B_i 越大,琴键堰的泄流能力越强,可能原因是倒悬比 B_o/B_i 越大使得侧面溢流前缘越靠近上游,提高了侧面泄流能力^[7,15]。

堰高与堰宽之比影响琴键堰泄流效率,当 $P/W<0.5$ 时,出口宫室的容量制约上游堰顶效率;当 $0.5<P/W<1.0$ 时,泄流量随着堰高的增大而增加;当 $P/W>1.0$ 时,泄流量与堰的高度无关; $P/W>1.3$ 时,琴键堰泄流能力由入口宫室的进水量控制。当琴键堰 $P/W=1.3$ 时,琴键堰具有最高的泄流能力^[7]。

当琴键堰高度不足时,可在堰顶部安装护墙,增加堰高,提升琴键堰泄流能力^[16]。在琴键堰顶设置护墙,增加堰高12.3%,可提升泄流能力15%^[17]。当护墙顶型式是半圆形,过堰水流流态良好,能够提升泄流能力^[18]。水头较低时,相比于下游1/4圆和平顶,上游1/4圆堰顶型式的泄流能力较大^[19]。

在琴键堰入口宫室上游顶点悬垂下方安装三角形或圆形的鼻墩,可降低进口能量损失并改善琴键堰上游流态,能够提升琴键堰泄流能力7%~10%^[18]。

与迷宫堰相比,琴键堰的悬臂几何结构有利于掺气泄流。低琴键堰需要增加人工掺气结构或堰顶护墙,增强水流从进水宫下游溢流堰泄流掺气,保证泄流能力^[18]。

3 琴键堰泄流流态对泄流能力的影响

琴键堰过堰水流是正向流与侧向流的混合体,进水宫室水流过侧堰后转向下游流动,与出水宫室水流相互撞击,流态复杂。当琴键堰堰上水头和上游来流流量不同时,在琴键堰结构体内产生不同流态,使得泄流效率也不同。低水头时,琴键堰各溢流前缘过水流基本呈自由下泄流态,互不干扰,此时泄流效率高。当水头上升后,出口宫室上游端逐步呈淹没流态,侧堰上下游水位差减小,侧堰泄流效率大幅度降低,致使溢流堰整体泄流效率降低^[4],泄量增大的优势也越来越弱,超泄比系数降低为 1.20~1.30。可见,通过琴键堰实现泄流量增加需要控制堰上水头处于合理水头范围。世界已建或在建琴键堰工程 H/P 值小于 0.70,泄流超泄比为 1.20~3.50^[20]。

当琴键堰堰上水头较小时,堰壁具有一定厚度,受水黏度和表面张力的影响,琴键堰过堰水流呈现薄层水舌运动,水舌上下摆动,存在贴壁流过渡为跳跃流、挑流的特定低水头行为^[21],影响琴键堰泄流效率。本文对已有试验资料进行分析,统计了明显低水头行为的琴键堰试验结构参数和水力学条件参数见表 1。文献 [21] 和 [18] 中琴键堰壁厚 T_s 大于 1 cm 时,发生低水头行为,当水舌下气体被带走时形成负压,泄流能力增强,呈现琴键堰流量系数出现极大值^[20]或者呈现时大时小现象^[15],过堰水流由跳跃水头转变为挑流的特定低水头行为发生在 $H/P=0.10\sim0.12$ 区间,相应 $H/T_s=1.52\sim3.15$ 。已有学者研究表明,直线堰发生特定低水头行为的水力学条件为 $H/T_s=1.80\sim3.00$ ^[22]。琴键堰侧堰过堰水流流态与直线堰不同,导致两者发生条件 H/T_s 略有不同。文献 [13] 和 [8] 中琴键堰壁厚为 2 mm 薄壁堰时,过堰水流分别为贴壁流和挑流,不发生低水头行为。

表 1 琴键堰结构参数和发生低水头行为时的水力学条件参数

Tab. 1 Structural parameters of five Piano Key weirs and hydraulic parameters when low head behavior occurs						
文献	W/m	B/m	P/m	T_s/m	低水头行为	发生低水头行为的水力学条件
[21]	0.600	0.630	0.525	0.020	发生	$H/P=0.11\sim0.12, H/T_s=2.89\sim3.15$
[18]	0.933	0.489	0.197	0.013	发生	$H/P=0.10\sim0.11, H/T_s=1.52\sim1.67$
[13]	0.169	0.412	0.155	0.002	否	-
[8]	0.500	0.400	0.150	0.002	否	-

当琴键堰堰上水头较大,过流流量系数与堰壁厚度 T_s 无关,流量系数 C_d 与堰上水头 H/P 呈现负指数幂函数关系,随着堰上水头的增加,流量系数逐渐减小^[8,23-24],最后出现收敛的趋势。

当上游来流量大,琴键堰泄流处于淹没状态时,随着淹没度增大,琴键堰泄流能力减小^[25]。当琴键堰泄流处于高淹没状态时,堰上水头和琴键堰结构参数对琴键堰泄流能力影响减弱。

4 琴键堰泄流能力计算

4.1 琴键堰泄流能力计算式

目前普遍的琴键堰泄流流量公式是将影响泄流能力的因素表达为流量系数 C_d 。根据堰流公式得到:

$$Q=C_dW\sqrt{2gH^{\frac{3}{2}}}$$

(1)

式中: Q 为泄流流量; C_d 为无量纲流量系数。近年来,国内外学者对琴键堰流量系数进行了计算分析,当堰上水头较大时,流量系数主要取决于 H/P 、 L/W 、 B/P 、 W_i/W_o 和 B_o/B_i ^[15,20],且与堰上水头呈现负指数幂函数关系,可表达为:

$$C_d = f\left(\frac{H}{P}, \frac{L}{W}, \frac{B}{P}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{B_i}{B_o}\right) = f\left(\frac{L}{W}, \frac{B}{P}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{B_i}{B_o}\right) \left(\frac{H}{P}\right)^m \quad (2)$$

式中: m 为待定系数, 需要根据实测资料拟合得出。

国内外学者结合模型试验成果整理拟合了多个琴键堰泄流流量公式, 本文列举了典型泄流流量系数公式, 并进行了对比分析。

(1) Leite Ribeiro 等^[26]的公式。采用流量系数比评估琴键堰的超泄能力, 在水槽试验中对不同琴键堰尺寸进行了多组模型试验, 结合试验结果拟合了自由出流条件下的泄流能力估算公式, 具体如下:

$$r = 0.8 + 0.34 \left(\frac{L}{W}\right)^{0.7} \left(\frac{W_i}{W_o}\right)^{0.08} \left(\frac{P_o}{P_i}\right)^{0.25} \left(\frac{P_i}{H}\right)^{0.82} \quad (3)$$

式中: r 为琴键堰泄流量与直线堰泄流量比值; P_i 和 P_o 分别为进出水宫室垂向堰高。

(2) Kabiri-Samani 等^[27]的公式。针对不同类型的琴键堰, 主要包括 A 型和 B 型, 在水槽中对不同琴键堰尺寸进行了多组模型试验力, 结合试验结果拟合了自由出流条件下的泄流能力估算公式, 具体如下:

$$C_d = \frac{2}{3} \left\{ 0.606 + \left[0.212 \left(\frac{H}{P}\right)^{-0.675} \left(\frac{L}{W}\right)^{0.377} \left(\frac{W_i}{W_o}\right)^{0.426} \left(\frac{B}{P}\right)^{0.306} \exp\left(1.504 \frac{B_o}{B} + 0.093 \frac{B_i}{B}\right) \right] \right\} \quad (4)$$

(3) Machiels 等^[10, 21]的公式。在水槽中对不同的结构参数琴键堰的泄流量进行了测量, 将流量系数分为 3 个部分, 包括进水宫室流量 C_{qu} 、出水宫室流量 C_{qd} 和侧堰流量 C_{qs} , 得到自由出流条件下琴键堰的流量系数 C_d 的计算式如下:

$$C_d = C_{qu} \frac{W_o}{W_u} + C_{qd} \frac{W_i}{W_u} + C_{qs} \frac{2B}{W_u} K_{wo} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{qu} = 0.374 \left(1 + \frac{1}{1000H + 1.6}\right) \left(1 + 0.5 \left(\frac{H}{H + P_T}\right)^2\right) \\ C_{qd} = 0.445 \left(1 + \frac{1}{1000H + 1.6}\right) \left(1 + 0.5 \left(\frac{H}{H + P}\right)^2\right) \\ C_{qs} = 0.41 \left(1 + \frac{1}{833H + 1.6}\right) \left(1 + 0.5 \left(\frac{0.833H}{0.833H + P_e}\right)^2\right) \left(\frac{P_e^\alpha + \beta}{(0.833H + P_e)^\alpha}\right) K_{wi} \end{array} \right. \quad (6)$$

式中: W_u 为一个琴键堰单元宽度值, $W_u = W_i + W_o + 2T_s$; K_{wo} 为考虑因出水宫水流与侧壁跌落水舌对沿侧墙方向堰流量的影响参数; $P_T = P + P_d$, P_d 为琴键堰堰下高度, P_e 为沿侧墙方向平均堰高, $P_e = P_T \frac{B_o}{B} + \frac{P}{2} \left(1 - \frac{B_o}{B}\right)$; α 和 β 反映了进水宫室的倾斜角度对侧堰流量的影响; K_{wi} 为考虑堰上流速不均匀性对侧堰流量影响的参数。

(4) 郭新蕾等^[20]的公式。结合多家不同琴键堰的代表性试验数据值, 考虑到缩尺效应和水流表面张力的影响, 将 H/P 限定在大于 0.1, 并选取在水流自由出流且倒悬比 $B_i/B_o=1$ 体型条件下的流量系数实测值进行拟合计算, 采用优化算法拟合了泄流流量系数, 计算式如下:

$$C_d = 0.1 + 0.285 \left(\frac{L}{W}\right)^{0.45} \left(\frac{B}{P}\right)^{0.1} \left(\frac{W_i}{W_o}\right)^{0.05} \left(\frac{H}{P}\right)^{-0.5} \quad (7)$$

(5) 姜铎等^[15]的公式。该试验琴键堰特征参数中, $L/W=5$ 、 $W_i/W_o=1.25$ 且 $B/P=3.75$, 是一种特例堰型, 对不同上下游倒悬比 B_i/B_o 该琴键堰体型开展了模型试验研究, 并拟合了关于倒悬比 B_i/B_o 的泄流流量参数估计式, 具体如下:

$$C_d = 0.01 + 0.89 \left(\frac{H}{P}\right)^{-0.487} \left(\frac{B_o}{B_i}\right)^{0.215} \quad (8)$$

4.2 计算式对比分析

(1)从影响因子分析。各计算式考虑侧重点略有差别。文献 [21] 公式包含结构参数较多, 不仅包含琴键堰设计结构参数, 还反映了进出宫室的倾斜角度对侧堰流量的影响、堰上流速不均匀性对侧堰流量的影响和出水宫水流及侧壁跌落水对沿侧墙方向堰流量的影响; 考虑因素较为复杂, 各项物理意义比较明确。文献 [20, 26-27] 公式中, 主要因素是琴键堰设计结构参数和堰上水头 H , 其中 H/P 和相对溢流前缘长度放大比 L/W 等因子的权重较大。文献 [15] 公式是关于倒悬比 B_i/B_o 和 H/P 的函数。

(2)从计算复杂程度分析。采用文献 [21] 公式估算琴键堰泄流能力, 涉及参数众多, 分布计算较为繁琐, 而文献 [20, 26] 公式计算相对简单。文献 [21, 26] 公式预测流量系数平均误差为 8%~15%, 而文献 [20] 计算公式精度较高, 整体误差在 8% 以内。

(3)从适用范围分析。目前国内外已有流量系数计算公式的试验参数均有一定的限制范围, 如文献 [27] 公式, 其 H/P 限制在 0.1~0.6, 局限性大^[20]。文献 [15] 公式是关于倒悬比 B_i/B_o 和 H/P 的函数, 适用于特定琴键堰体型, $L/W=5$ 、 $W_i/W_o=1.25$, 且 $B/P=3.75$ 。

4.3 本文计算公式

收集现有国内外琴键堰泄流流量系数研究成果, 选取试验资料包括文献 [8,13,18,21,23] 试验数据和文献 [21] 中法国 Escouloubre 琴键堰的原型观测数据 (No.(8))。各琴键堰体型的结构参数包含 L 、 W 、 B 、 P 、 W_i 、 W_o 及 B_o 、 B_i 等众多关键结构参数 (表 2)。各种体型在自由出流条件下的流量系数 C_d 实测结果和泄流量实测结果见图 2 和 3, 图中各体型序号为表 2 中 No. 排序。本文选取 $H/P>0.1$ 条件下的试验结果, 未考虑低水头条件下由表面张力和水舌下气体被带走形成负压等因素而引起的缩尺效应。

表 2 引用文献中琴键堰参数统计
Tab. 2 Structural parameters of sixteen Piano Key weirs selected from the existing papers

文献	特征参数					文献	特征参数				
	L/W	B/P	W_i/W_o	B_i/B_o	No.		L/W	B/P	W_i/W_o	B_i/B_o	No.
[21]	4.15	1.2	1	1	(1)	[13]	8.96	2.66	1.2	1	(9)
	5	1.5	1.57	3	(2)	[18]	5.19	2.48	1.26	1	(10)
	5	1.5	1.57	1	(3)	[8]	4.2	2.67	1	1	(11)
	5	1.5	1.57	0.33	(4)		5	3.75	1.25	1	(12)
	5	4	1.57	3	(5)		5	3.75	1.25	0.67	(13)
	5	4	1.57	1	(6)	[23]	5	3.75	1.25	0.5	(14)
	5	4	1.57	0.33	(7)		5	3.75	1.25	0.4	(15)
	4.29	2.88	1.44	1	(8)		5	3.75	1.25	0.33	(16)

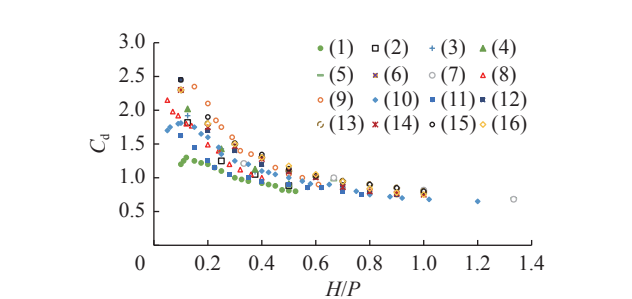


图 2 流量系数 C_d 实测值与 H/P 的函数关系
Fig. 2 Relationship between discharge coefficient C_d and H/P from the existing papers

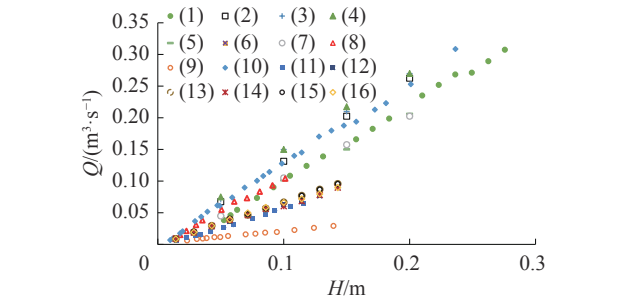


图 3 引用文献流量 Q 实测值与堰上水头 H 的函数关系
Fig. 3 Relationship between discharge Q and H from existing papers

由图2可见,流量系数 C_d 与 H/P 呈负幂指数函数关系, H/P 作为自变量,利用最小二乘法对上述试验数据拟合得到 $m=-0.485$,其相关系数为 0.872,拟合后的函数公式可写为:

$$C_d = 0.1 + a \left(\frac{L}{W} \right)^b \left(\frac{B}{P} \right)^c \left(\frac{W_i}{W_o} \right)^d \left(\frac{B_i}{B_o} \right)^e \left(\frac{H}{P} \right)^{-0.485} \quad (9)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 和 e 为待定系数。因待定系数较多,本文利用 Matlab 软件遗传算法工具箱拟合 5 个参数函数,经迭代收敛后获得最优解,具体如下:

$$C_d = 0.1 + 0.269 \left(\frac{L}{W} \right)^{0.39} \left(\frac{B}{P} \right)^{0.21} \left(\frac{W_i}{W_o} \right)^{0.15} \left(\frac{B_i}{B_o} \right)^{0.05} \left(\frac{H}{P} \right)^{-0.485} \quad (10)$$

图4为式(10)的计算对比结果,仍采用表2和图2中的琴键堰尺寸和试验数据,限于篇幅,本文只列出代表性结果。为评估其超泄能力,也给出了文献[15,20]公式的计算结果。图4(a)引用文献[18]实测流量系数值,式(10)和文献[20]公式适用,两者模拟精度基本一致,平均整体误差分别为 4.3% 和 3.5%,方差均值为 0.017 和 0.051。图4(b)引用文献[8]实测流量系数值,式(10)和文献[20]公式模拟平均整体误差分别为 5.3% 和 7.8%,方差均值为 0.049 和 0.055。图4(c)引用文献[21]实测流量系数值,式(10)和文献[20]公式模拟结果与实测值基本一致,平均整体误差均小于 5%。图4(d)引用文献[23]实测流量系数值,式(10)和文献[15]公式适用,当 $H/P < 0.4$ 时,模拟误差较大,平均误差约为 10%,但随着水头增加,当 $H/P > 0.4$ 时,预测精度较高,两者整体平均误差分别为 6.0% 和 5.4%,方差均值为 0.026 和 0.034。总体而言,3 个公式预测的流量系数值与实测值较为接近。

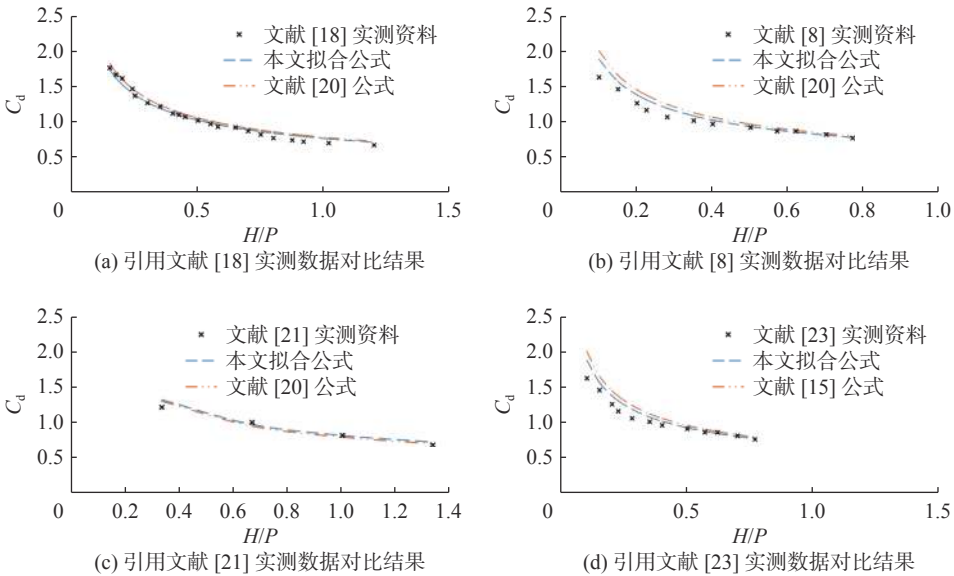


图4 琴键堰流量系数公式计算结果对比

Fig. 4 Comparison between the calculation results of the coefficient and the experimental data

为进一步验证式(10)的可靠性,本文设计了一个特定琴键堰体型开展了泄流能力试验。该体型为 A 型琴键堰,主要结构参数为 $W=1.403$ m、 $W_o=0.113$ m、 $W_i=0.135$ m、 $B=0.618$ m、 $B_i=B_o=0.155$ m、 $P=0.233$ m;相应关键结构参数比 $L/W=6.266$ 、 $W_i/W_o=1.2$ 、 $B_i/B_o=1.0$ 、 $B/P=2.658$,堰顶部不增设护墙。试验布置见图5。测量水流条件为流量范围 $Q=50\sim300$ L/s、 $H/P=0.1\sim0.5$;流量采用量水堰量测,水位采用水位测针读取,精度为 0.1 mm。典型工况条件下琴键堰泄流流态见图6。

图7为试验测量结果与公式计算结果对比。可见,当 $H/P < 0.1$ 时,本文计算公式、文献[20]公式估算值

偏大,考虑到琴键堰试验模型由有机玻璃制作而成,堰顶厚度为 1.8 cm,堰上水头较小时,水体表面张力引起低水头现象,因此误差较大。但当 $H/P>0.1$ 时,2 个公式的估算值与实测值都非常接近,整体平均误差分别为 3.9% 和 3.1%,方差均值分别为 0.05 和 0.04。因此,当 $H/P>0.1$ 时,本文公式可估算琴键堰泄流能力。

本文公式为基于琴键堰关键结构参数 L/W 、 B/P 、 W_i/W_o 和 B_o/B_i 的拟合公式,与以往类似公式相比,拟合公式中多了 B_i/B_o 项,不仅适用于 A 型琴键堰,也可用于倒悬比 B_i/B_o 不为 1 的 B 型琴键堰,而且采用本文公式估算泄流能力相对简单。

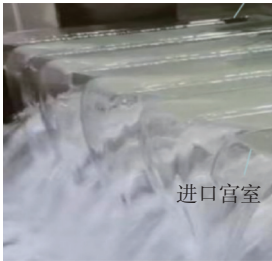


图 6 当 $H/P=0.1$ 时琴键堰流态
Fig. 6 Flow regime when $H/P=0.1$

5 结 语

与直线堰相比,在适当低水头条件下,琴键堰可大幅提升溢流堰过流能力,有效解决新形势下超标洪水导致已有水利工程防洪泄流能力不足问题。本文对琴键堰泄流能力影响因素和流态特征进行归纳总结,并对现有泄流能力估算公式进行对比分析,得出以下结论:

- (1)不同琴键堰结构参数对琴键堰泄流能力的影响程度不同,应结合实际需求和空间限制条件,选取最佳参数值以获得最佳泄流能力。
- (2)当堰上水头较小,如果琴键堰壁厚 T_s 大于 1 cm, $H/P=0.10\sim0.12$ 时会发生低水头行为,从而影响泄流效率,相应 $H/T_s=1.52\sim3.15$ 。
- (3)针对堰上水头较大、流量系数 C_d 与堰上水头 H/P 呈负指数幂函数关系的琴键堰,本文对比分析了已有琴键堰流量系数公式,并推导了基于 L/W 、 B/P 、 W_i/W_o 和 B_o/B_i 的流量系数公式,所得公式平均整体误差小于 6%,适用于 $H/P>0.1$ 、自由出流、A 型和 B 型琴键堰体型。
- (4)文献 [21] 公式考虑影响参数众多,物理意义清晰,但是计算较为繁琐,适用于注重对琴键堰水力学细节分析的情况。本文公式、文献 [20] 公式和文献 [15] 公式均计算简单且精度较高,适用于琴键堰整体泄流能力的估算,可根据实际需求选取合适的估算公式。

参 考 文 献:

[1] 张士辰,李宏恩. 近期我国土石坝溃决或出险事故及其启示[J/OL]. 水利水运工程学报. (2021-10-24)[2022-04-06].

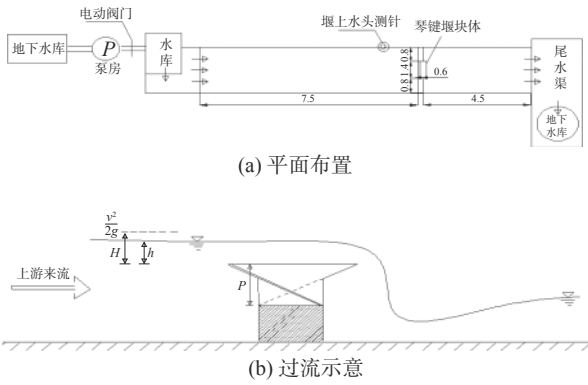


图 5 琴键堰试验装置(单位: m)
Fig. 5 Piano Key weir test model layout (unit: m)

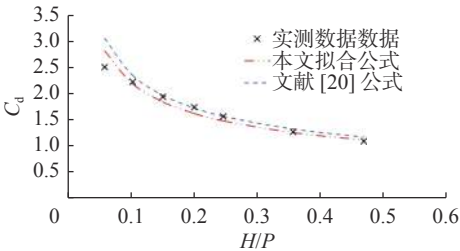


图 7 本文试验实测结果与计算结果对比
Fig. 7 Comparison between calculation results of coefficient and experimental data

- <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1613.TV.20220402.1903.002.html>. (ZHANG Shichen, LI Hongen. 2021 earth-filled dam failure or danger accident of reservoirs in China and its enlightenment[J/OL]. Hydro-Science and Engineering. (2021-10-24) [2022-04-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1613.TV.20220402.1903.002.html>. (in Chinese))
- [2] 盛金保, 沈登乐, 傅忠友. 我国病险水库分类和除险技术[J]. 水利水电工程学报, 2009(4): 116-121. (SHENG Jinbao, SHEN Dengle, FU Zhongyou. Classification and rehabilitation of defective dams in China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2009(4): 116-121. (in Chinese))
- [3] 彭新民, 崔广涛, 贾树宝. 迷宫堰泄流能力及水力特性的试验研究[J]. 天津大学学报, 2003, 36(6): 727-730. (PENG Xinmin, CUI Guangtao, JIA Shubao. Study on discharge capacity of labyrinth weir[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(6): 727-730. (in Chinese))
- [4] 李国栋, 苗洲, 高蓓, 等. 琴键堰不同溢流前缘泄流特性的数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(8): 77-84. (LI Guodong, MIAO Zhou, GAO Bei, et al. Numerical study on discharge capacity of Piano-Key weir at its different overflow edges[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(8): 77-84. (in Chinese))
- [5] LEMPÉRIÈRE F, OUAMAN A. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways[J]. Hydropower and Dams, 2003, 7(5): 144-149.
- [6] LEMPERIERE F. New Labyrinth weirs triple the spillways discharge[J]. Water and Energy International, 2011, 68(11): 77-78.
- [7] 胡亚卓, 拾兵. 琴键堰在水利界的研究与应用现状[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(增刊1): 143-148. (HU Yazhuo, SHI Bing. Status of research and application for Piano Key weir in hydraulic engineering[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(Suppl1): 143-148. (in Chinese))
- [8] 耿运生, 孙双科. 一种新型的迷宫堰布置形式-P. K堰[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(4): 57-59. (GENG Yunsheng, SUN Shuangke. A new type of labyrinth weir-P. K weir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(4): 57-59. (in Chinese))
- [9] ERPICUM S, LAUGIER F, PFISTER M, et al. Labyrinth and Piano Key weirs II[M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [10] MACHIELS O, ERPICUM S, DEWALS B J, et al. Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key weir[J]. Journal of Hydraulic Research, 2011, 49(3): 359-366.
- [11] 李珊珊, 李国栋, 苗洲, 等. 琴键堰不同堰高泄流特性的数值模拟[J]. 水利水电技术, 2016, 47(5): 60-64. (LI Shanshan, LI Guodong, MIAO Zhou, et al. Numerical simulation study on discharge characteristics of Piano-Key weir with various heights[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(5): 60-64. (in Chinese))
- [12] BARCOUDA M, CAZAILLET O, COCHET P, et al. Cost-Effective increase in storage and safety of most dams using fuse gates or P. K. weirs[C]//Proceeding of the 22nd congress of ICOLD, Barcelona, Spain, 2006.
- [13] OUAMANE A, LEMPÉRIÈRE F. Design of a new economic shape of weir[C]//Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century, Two Volume Set. Boca Raton: CRC Press, 2006: 463-470.
- [14] LEMPERIERE F, GUO J. Low cost increase of dams storage and flood mitigation: the Piano Keys weirs[C]//International Commission on Irrigation and Drainage Nineteenth Congress. Beijing: International Commission on Irrigation and Drainage, 2005.
- [15] 姜铎, 李国栋, 李珊珊. 不同上下游倒悬比琴键堰泄流特性试验研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(7): 124-130. (JIANG Duo, LI Guodong, LI Shanshan. Experimental study on discharge characteristics of different upstream-downstream overhang ratios of Piano Key weir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(7): 124-130. (in Chinese))
- [16] MACHIELS O, ERPICUM S, ARCHAMBEAU P, et al. Parapet wall effect on Piano Key weir efficiency[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139(6): 506-511.
- [17] RIBERRO M L, BIERI M, BOILLAT J L, et al. Hydraulic capacity improvement of existing spillways-Design of Piano Key weirs[C]//Proceeding of 23rd Congress of ICOLD. Brasilia: Commission Internationale Des Grands Barrages, 2009.
- [18] ANDERSON R M. Piano Key weir head discharge relationships[D]. Logan: Utah State University, 2011.
- [19] RIBEIRO M L, BOILLAT J L, SCHLEISS A J, et al. Rehabilitation of St-Marc dam experimental optimization of a Piano Key weir[C]//Proceedings of the 32nd IAHR World Congress. Venice, 2007.
- [20] 郭新蕾, 杨开林, 夏庆福, 等. 琴键堰泄流能力特性分析[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 867-874, 882. (GUO Xinlei, YANG Kailin, XIA Qingfu, et al. Discharge capacity characteristics of Piano Key weir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 867-874, 882. (in Chinese))
- [21] MACHIELS O. Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key weirs[D]. Liege: University of Liege, 2012.

- [22] JOHNSON M C. Discharge coefficient analysis for flat-topped and sharp-crested weirs[J]. *Irrigation Science*, 2000, 19(3): 133-137.
- [23] 姜铎. 琴键堰倒悬比参数优化及下游冲刷形态数值模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020. (JIANG Duo. Study on parameter optimization of Piano Key weir upside down ratio and numerical simulation of downstream scour[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [24] 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, 28(6): 94-97. (REN Xiping, LI Huan, LIU Shanjun. Deep research on discharge capacity of WES weir in multiple respects[J]. *Sichuan Water Power*, 2009, 28(6): 94-97. (in Chinese))
- [25] AL-BAGHDADI M B, KHASSAF S I. Experimental investigation of submerged flow over Piano Key weir[J]. *International Journal of Energy and Environment*, 2018, 9(3): 249-260.
- [26] LEITE RIBEIRO M, BIERI M, BOILLAT J L, et al. Discharge capacity of Piano Key weirs[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(2): 199-203.
- [27] KABIRI-SAMANI A, JAVAHERI A. Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2012, 50(1): 114-120.

Calculation analysis on the discharge capacity of Piano Key weir and relative influencing factors

LI Yanfu, HAN Changhai, LI Zixiang, HAN Kang, YU Kaiwen

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In recent years, the problem of insufficient discharge capacity of the existing hydraulic projects has become more and more serious due to the frequent occurrence of extreme floods. The Piano Key weir has a high-efficiency discharge capacity when the water head on the weir is properly low. The calculation analysis of its discharge capacity has great practical value. The discharge capacity is related to the main structural parameters of the Piano Key weir and the water head on the weir. In this study, the influencing structural parameters of discharge capacity of the Piano Key weir was summarized, and the optimal values were suggested. Different overflow patterns formed on the Piano Key weir under different hydraulic conditions. Low water head behavior happened when the water head flowing on the Piano Key weir was low. Based on the existing experimental data, the hydraulic condition and structural parameters when low water head behavior happened were statistically analyzed. A comparative analysis on the existing discharge capacity estimation formulas of the Piano Key weir was performed. Then, based on the existing experimental data, a new discharge coefficient formula including L , W , B , P , W_i/W_o and B_o/B_i was proposed using the least squares method and genetic algorithm, and the predicted results were in good agreement with the experimental data of a large number of different Piano Key weirs with the average error less than 6%. Among the estimation formulas, Machiels' formula is suitable for the detailed analysis of the discharge of the Piano Key weir. The new formula in this study and Guo Xinlei's formula are both simple in calculation and can be used to estimate the overall discharge capacity of the Piano Key weir, and the suitable formula can be selected according to the practical requirement.

Key words: large flood; sluice structure; Piano Key weir; discharge capacity; discharge coefficient