

马玉晨, 张法星, 喻泽, 等. 高拱坝表孔宽尾墩收缩比对流态的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 169-180. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.014

MA Yuchen, ZHANG Faxing, YU Ze, et al. Study on the influence of contraction ratio of flaring gate pier on flow pattern of high arch dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 169-180. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.014

高拱坝表孔宽尾墩收缩比对流态的影响研究

马玉晨, 张法星, 喻泽, 郭帆, 孙宇佳

(四川大学 山区河流保护与治理全国重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:【目的】窄河谷高拱坝常采用表孔宽尾收缩射流技术以实现高拱坝表深孔无碰撞泄洪消能。宽尾墩收缩比过大时,水舌纵向拉伸不充分,会导致入水集中加剧下游冲刷;收缩比过小时,流道内发生壅水,可能降低表孔泄流能力同时会恶化挑流水舌流态。找到壅水发生的收缩比临界值可为宽尾墩体型设计提供依据。【方法】采用水工模型试验和三维数值模拟计算相结合的方法,研究了宽尾墩收缩比、始折点、收缩段长、堰面俯角和堰顶水头对流态的影响。【结果】结果表明:在其他参数相同仅改变收缩比的条件下,随着宽尾墩收缩比的缩小,存在一个临界收缩比,当收缩比小于临界收缩比时,表孔内出现壅水流态;基于360多种计算体型工况试验,得到了48组临界收缩比试验数据。【结论】给出了临界收缩比与堰顶水头、堰面曲线定型设计水头、堰顶与闸墩始折点高差、收缩段长和堰面俯角的定量关系式,经验证该公式具有较高精度,可为高拱坝表孔宽尾墩体型设计提供参考。

关键词:表孔;宽尾墩;模型试验;数值模拟;堰顶水头;收缩比

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.014

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号:TV132.29

文献标志码:A

文章编号:1000-0860(2025)01-0169-12



与作者互动
听语音
聊科研

Study on the influence of contraction ratio of flaring gate pier on flow pattern of high arch dam

MA Yuchen, ZHANG Faxing, YU Ze, GUO Fan, SUN Yujia

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] The flaring gate pier contraction jet technology is commonly employed in narrow valley high arch dams to facilitate collision-free flood discharge and energy dissipation of the surface spillway and deep hole. Excessive contraction ratio of the flaring gate pier result in inadequate longitudinal tension of the jet flow, causing water inflow concentration and exacerbating downstream scouring. Conversely, if the contraction ratio is too small, backwater can develop in the flow channel, leading to a potential reduction in the discharge capacity of the surface spillway and degradation of the jet shape. Determining the critical value of the contraction ratio for backwater can serve as a foundation for designing the shape of the flaring gate pier. [Methods] The effects of contraction ratio, initial turning point, contraction section length, weir surface pitch angle, and head on weir crest on the flow state of a flaring gate pier are investigated through hydraulic model experiments and three-dimensional numerical simulations. [Results] The results indicate that, with all other parameters held constant and only the contraction ratio varied, a critical contraction ratio exists for the flaring gate pier. When the contraction ratio falls below this critical value, backwater flow occurs in the surface spillway. Through over 360 calculation cases, 48 sets of experimental data on the critical contraction ratio

收稿日期: 2024-02-21; 修回日期: 2024-04-19; 录用日期: 2024-04-25; 网络出版日期: 2024-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52192673)

作者简介: 马玉晨(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程水力学研究。E-mail: 1194949310@qq.com

通信作者: 张法星(1979—), 男, 研究员, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: zhfx@scu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

are collected. [Conclusion] The results provide a quantitative relationship between the critical contraction ratio and the head on weir crest, stereotyped design head, height difference between the crest and initial turning point, length of the contraction section, and angle of the weir surface. The formula's high accuracy has been verified, providing valuable reference for designing the flaring gate pier of a high arch dam.

Keywords: surface orifice; flaring gate piers; model test; numerical simulation; head on weir crest; contraction ratio

0 引言

为改善表深孔水舌碰撞式消能雾化降雨范围广、强度大的问题,窄河谷高拱坝可采用坝身表深孔水舌无碰撞+下游水垫塘的泄洪消能方式^[1-3]。高拱坝坝身孔口常采用收缩射流技术使水舌横向收缩,纵向扩散,以达到表深孔水舌相间穿插下泄而不发生碰撞的目的^[4]。深孔作用水头大、出口流速高,利用常规窄缝挑坎就能较好地控制水舌^[5-7]。而表孔溢流道短、作用水头小和出口流速低,水舌导控难度大^[8]。

隔河岩重力拱坝开创了宽尾墩应用到高拱坝表孔的先河,该工程采用表孔不对称宽尾墩+深孔下弯式窄缝解决了拱坝溢流的向心集中问题,消能效果显著^[9]。锦屏一级双曲拱坝采用表孔底坡透空宽尾墩+深孔平直出口式窄缝,解决了“孔口分层出流,射流空中无碰撞”的技术难题^[10]。目前正在建的叶巴滩高拱坝、东庄水利枢纽、孟底沟高拱坝也采用了表孔宽尾墩体型^[4-12]。

宽尾墩是通过逐渐加宽溢流表孔闸墩厚度,强迫过堰水流横向收缩、纵向拉伸的一种收缩式消能工^[13]。高拱坝表孔采用宽尾墩消能,射流水舌纵向拉伸进入下游水体,通过缩小射流核心尺寸、减小入水单孔流量、加剧下游水体剪切紊动的方式,大幅度提高水体消能率^[14]。此外,表孔宽尾墩挑射水舌窄长,相邻射流间形成一定范围无水区,为坝身表深孔水舌空中无碰撞泄洪消能创造了条件^[4]。

李福田等^[15]在溪洛渡1:100整体模型上对表孔宽尾墩的水流流态开展了试验研究,研究指出当宽尾墩收缩比减小到一定值时,表孔内会出现水跃壅水流动态,继续减小收缩比,整个流道内会逐渐演变为缓流流态。朱新元^[16]通过表孔宽尾墩和深孔窄缝联合消能整体模型试验,对不同收缩程度的高拱坝宽尾墩表孔射流分散效果进行了试验研究,结果表明收缩比较大时($\beta=0.5$),流道内虽是急流冲击波流态,但表孔水舌空中纵向拉伸不充分,水舌分散效果差;而收缩比较小时($\beta=0.3$),表孔内易发生壅水呈现缓流流态,导致泄流能力降低。阮小蓉^[17]通过模型试验研

究了不同宽尾墩起折点下收缩比对流态的影响规律,研究表明始折点离堰顶越近、收缩比越小时流道内越容易产生壅水。刘金星^[18]结合东庄水利枢纽整体水工模型试验,研究了流态与收缩比、堰上水头和收缩段长的关系,指出在流道内是急流冲击流态的条件下,堰上水头越小、收缩段长越长时,适当减小收缩比可以获得纵横向扩散更充分的水舌。练继建等^[19]同样依托东庄水利枢纽,用数值模拟的方法研究了俯角、收缩比对高拱坝表孔泄流流态的影响,结果显示俯角和收缩比越大时,流道内越不容易产生壅水。补金梓等^[12]基于孟底沟水电站,采用数值计算的方法,研究了宽尾墩(出口俯角 30°)收缩比、收缩率对表孔泄流流态的影响,指出收缩率较小时宽尾墩起折点离堰顶较近,表孔内容易产生壅水,增大收缩比能一定程度地改善流道流态。TIAN等^[20]采用模型试验的方法,研究了有限堰长条件下宽尾墩收缩比对流道流态的影响,结果表明较高堰顶水头和较小收缩比条件下,流道内水面线为壅水曲线。张公平等^[21]依托锦屏一级工程,通过模型试验的方法,对0.318~0.400收缩比范围内不同透孔比底板宽尾墩流态进行了研究,结果表明随着透空比的增大水舌纵向拉伸效果变好。钟杰等^[22]采用模型试验和数值计算结合的方法,研究了燕尾底坡型在高拱坝表孔的泄流流态,结果表明数值计算的水舌形态跟试验值吻合较好,燕尾形底板的水舌纵向拉伸效果显著。

综上所述,表孔宽尾墩在多座窄河谷高拱坝上都得到了应用,解决了不同高坝工程的泄洪消能难题。以往对表孔宽尾墩流态研究大多都基于相关工程,研究了堰顶水头、宽尾墩始折点、收缩段长、堰面俯角等参数对表孔宽尾墩流态和泄流能力的影响规律,但多以定性研究为主,未能给出不同流态的判别条件,也未能给出一个使流道内不发生壅水的相对具体的收缩比取值范围。高拱坝表孔宽尾墩泄流流态是非常复杂的三维水力学问题,完全靠理论计算是难以解决的,所以一直以来的研究方法都以试验为主。早些年多以传统的水工模型试验为主,近年来随着湍流模型的完善和计算机性能的提高,用三维数值模拟来研究宽尾墩表孔复杂三维泄流流态的案例也逐渐增

多, 数值模拟的一些计算结果的可靠性也得到了试验验证^[23-24]。

在高拱坝表孔宽尾墩的体型设计中, 为获得拉伸效果更充分的空中水舌形态和尽可能分散入水水股流量集中程度, 通常宽尾墩的收缩比就要尽可能小^[25]。然而, 宽尾墩的收缩比过小会导致表孔内出现壅水流动态。壅水流动态一方面可能会影响表孔泄流能力, 另一方面影响挑流水舌形态, 增大对下游的冲刷。流道壅水是高拱坝表孔宽尾墩体型设计中必须避免的。所以, 收缩比减小到何种程度会出现壅水流动态是一个非常值得研究的问题。在前人研究基础上, 本文采用室内模型试验和数值模拟计算相结合的方法, 研究高拱坝表孔壅水现象产生的条件以及收缩比、堰顶水头、始折点位置、收缩段长和堰面俯角对高拱坝表孔壅水的影响规律, 并给出了壅水流动态发生临界值的定量计算公式。

1 研究方法

1.1 模型试验

试验模型(见图 1)主要由循环水系统、量堰、库区、表孔和水垫塘组成。其中, 表孔溢流坝剖面采用 WES 型实用堰, 定型设计水头 $H_d = 0.2214 \text{ m}$, 堰面方程为 $Y = 0.0226X^{1.85}$, 曲线下游接斜坡段。宽尾墩体型参数如图 2 所示, 主要包括直线段俯角 θ , 收缩比 $\beta = b/B$, 收缩角 $\varepsilon = \arctan[(B - b)/2L]$, 始折点位置 $\xi_x = x_k/H_d$ 、 $\xi_y = y_k/H_d$ 。其中, B 为表孔收缩前宽度、 b 为表孔出口宽度、 L 为始折点到出口水平长度、 x_k 和 y_k 分别为始折点到堰顶的水平距离和垂直距离。下游水垫塘长 2.0 m, 宽 0.6 m, 深 0.6 m, 水

垫塘底板到堰顶的垂直距离为 1.2 m。用专用探针测量堰顶水头, 用移动滑轨和精度为 1 mm 的钢尺测量表孔水面线。

宽尾墩体型参数和试验工况如表 1 所列。

1.2 数值模拟

1.2.1 数学模型

三维数值模拟采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型^[26], 并采用 VOF 法^[27-28] 捕捉自由表面。基本控制方程如下。

连续性方程和动量方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

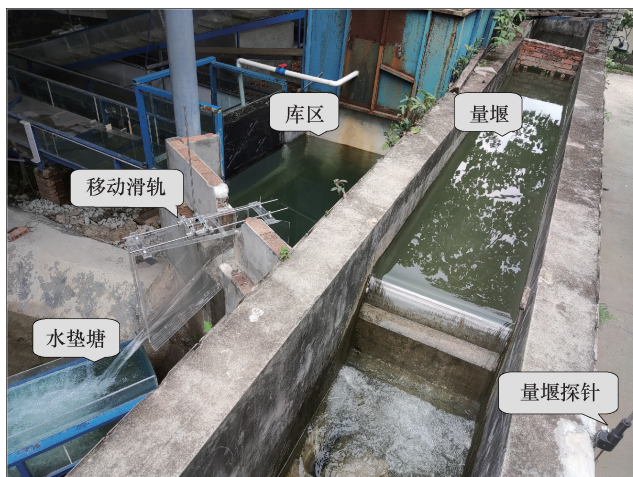
$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j D) \\ &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

k 方程和 ε 方程

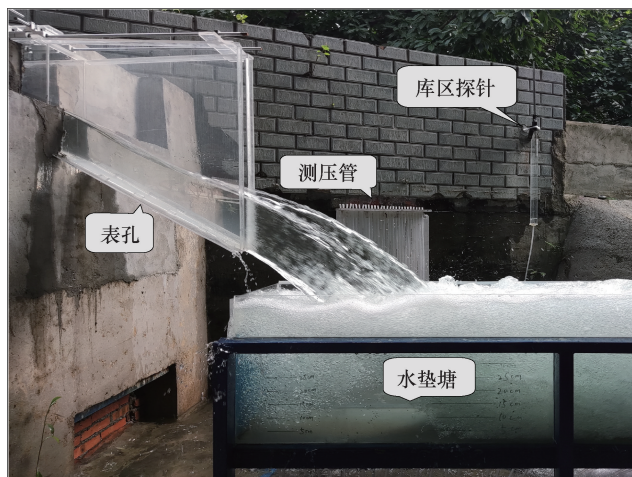
$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ & \mu_T \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_T \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, \bar{u}_i 和 \bar{u}_j 分别为 x_i 和 x_j 方向的平均速度; t 为时间; \bar{p} 为平均压力; μ 为分子黏性系数; μ_T 为涡黏性系数, 可由湍动能 k 和耗散率 ε 来确定, 公式为



(a) 俯视



(b) 侧视

图 1 模型布置

Fig. 1 Model layout

表 1 宽尾墩体型参数和工况

Table 1 Parameters of flaring pier gates and cases

工 况	堰顶水头 H/H_d	俯角 θ /($^\circ$)	始折点位置 (ξ_x, ξ_y)	收缩段水平长度 L /m	收缩比 β
1	0.298	35	(0.723, 0.275)	0.6	0.091
2	0.524				
3	0.678				
4	0.750				
5	0.818				
6	1.052				
7	1.174				
8—21	0.813				0.060、0.100、0.110、0.126、0.128、0.129、0.130、0.142、0.144、0.146、0.148、0.150、0.300、1.000
22—32	1.000				0.150、0.155、0.156、0.157、0.158、0.160、0.163、0.164、0.165、0.167、1.000
33—41	1.084				0.150、0.155、0.160、0.166、0.167、0.168、0.170、0.180、1.000
42—52	1.174				0.170、0.171、0.172、0.173、0.175、0.176、0.177、0.178、0.179、0.180、1.000
53—60	1.265				0.180、0.181、0.182、0.183、0.184、0.185、0.186、1.000

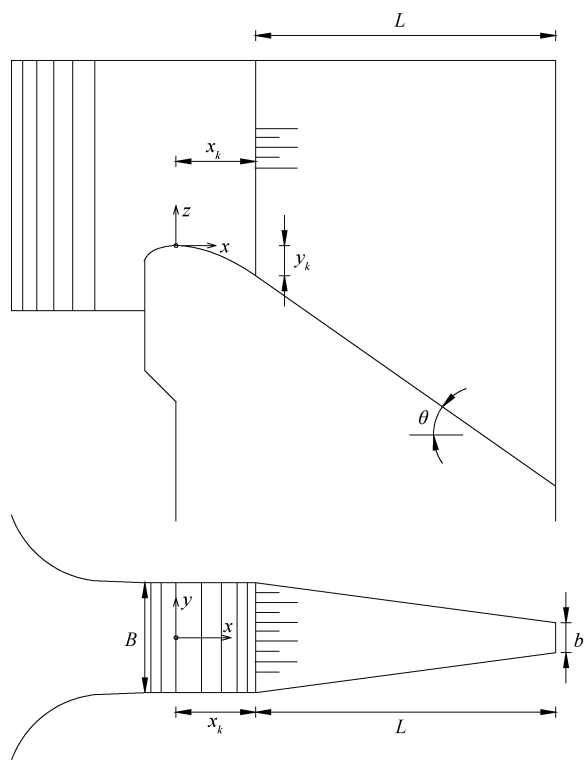


图 2 宽尾墩体型参数示意

Fig. 2 Schematic diagram of the parameters of flaring gate pier

$\mu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, C_μ 为经验常数, 取 0.0845; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的紊流普朗特常数, 均取 0.7179; C_1 和 C_2 为经验系数, 分别取 1.42、1.68。

1.2.2 计算区域

计算中, 对库区、表孔和水垫塘进行三维几何建模, 如图 3 所示。建立了三维坐标系, 堰顶中心为坐

标原点, x 为顺水流方向, 向下游为正; y 为垂直水流方向, 向左岸为正; z 为竖直方向, 向上为正。由于模型表面由大部分平面和小部分曲面构成, 结构相对简单, 网格划分采用基于笛卡尔坐标系的结构化正六面体网格。网格尺寸为 $5.88 \text{ mm} \times 5.88 \text{ mm} \times 5.88 \text{ mm}$, 网格总数约 1 900 万。

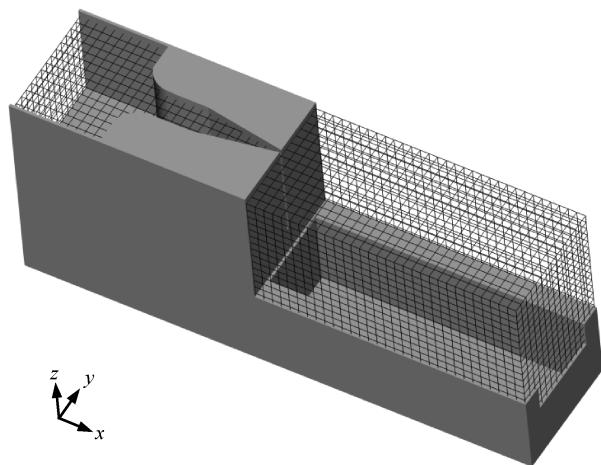


图 3 计算区域示意

Fig. 3 Schematic diagram of the computational area

1.2.3 网格无关性验证

合理的网格数量既能保证数值计算结果的精度, 又有较高的计算效率。图 4 是工况 3 ($H = 0.678H_d$) 不同网格数量的表孔水面线 ($y = 0$ 剖面) 的计算值, 当网格总数 $T > 1400$ 万后水面线计算值与实测值的差异就很小, 但为了能更精细地捕捉流态细节, 在计算效率可接受范围内最终选取了 1 900 万的总网格数。

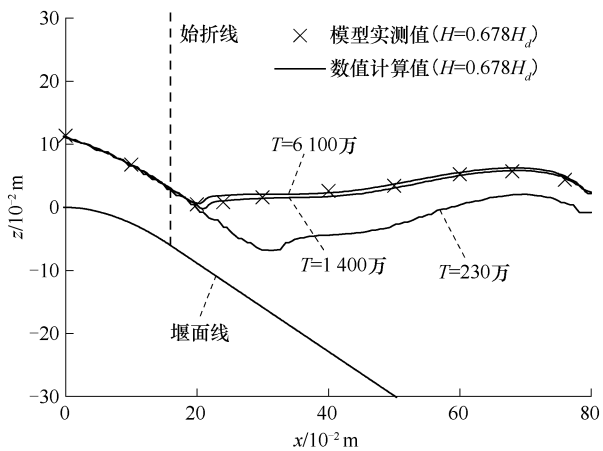


图4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid-independent verification

1.2.4 数值计算结果验证

工况 1 ($H = 0.298H_d, \beta = 0.091$) 试验和计算流态的对比情况如图 5 所示, 表孔水流为急流冲击波流

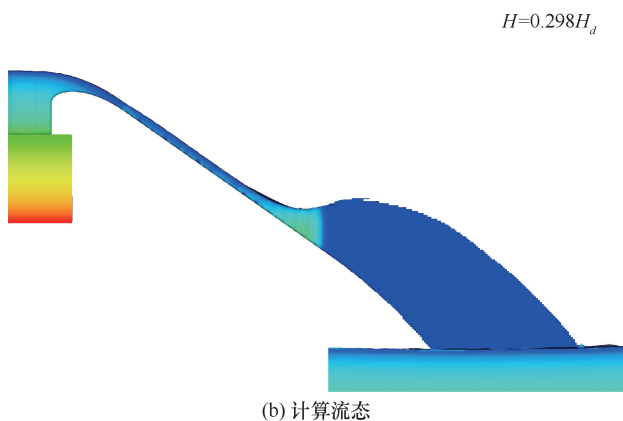
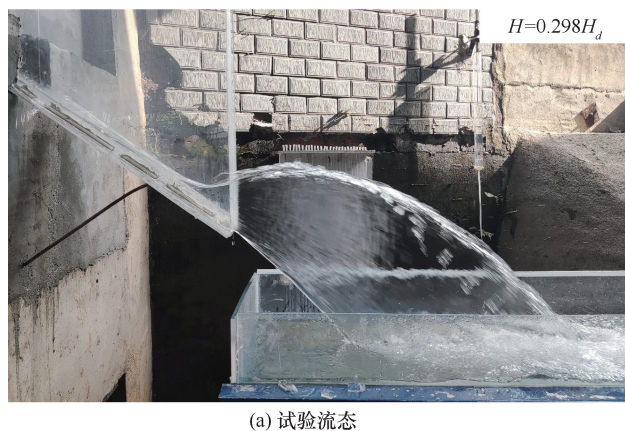


图5 急流冲击波流态对比

Fig. 5 Rapid shock wave flow comparison

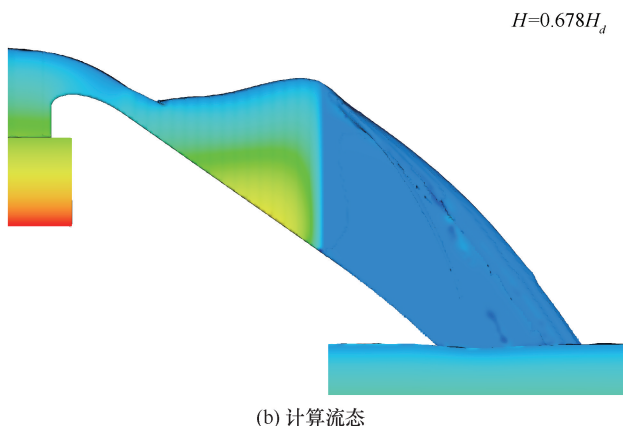


图6 水跃壅水流态对比

Fig. 6 Hydraulic jump backwater flow comparison

态, 经宽尾墩后纵向拉伸, 在空中形成薄片状水舌; 工况 3 ($H = 0.678H_d, \beta = 0.091$) 试验和计算流态的对比情况如图 6 所示, 表孔内表层水流发生旋滚水跃, 空中水舌形态呈现“上厚下窄”状; 工况 7 ($H = 1.174H_d, \beta = 0.091$) 试验和计算流态的对比情况如图 7 所示, 孔内水流为缓流, 表层水冠占比增加, 水舌入水发生重叠, 入水单宽增加。综合来看, 数值计算流态与试验流态吻合较好。

图 8 是不同堰顶水头下表孔水面线的对比, 计算值与试验测量水面线吻合程度较好。

2 结果与分析

2.1 表孔宽尾墩典型流态

在堰顶水头、堰面型式和宽尾墩其他体型参数相同的情况下, 随着收缩比的变化, 表孔内存在四类典型流态, 四类典型流态的流速分布 ($y=0$ 剖面) 如图 9 所示。

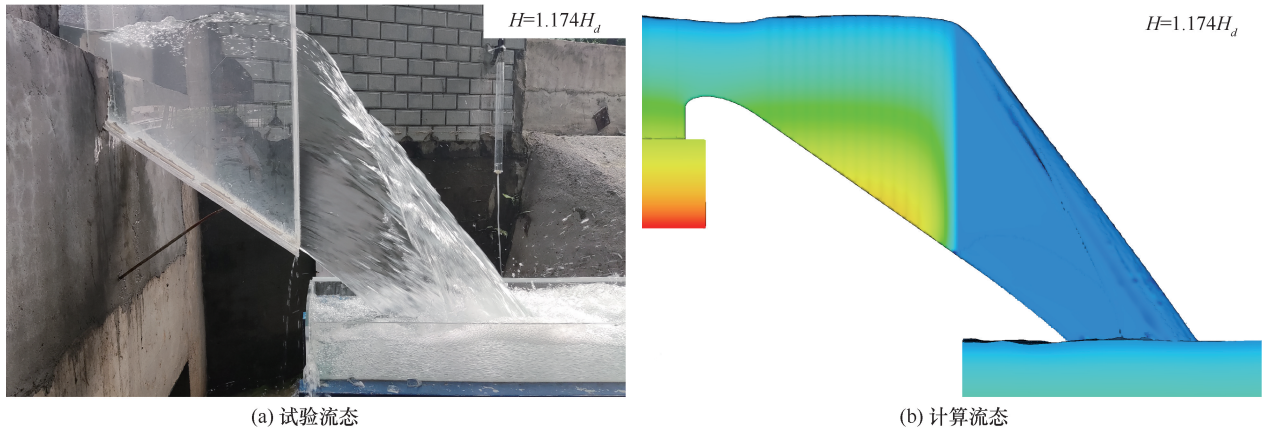


图7 缓流流态对比

Fig. 7 Tranquil flow comparison

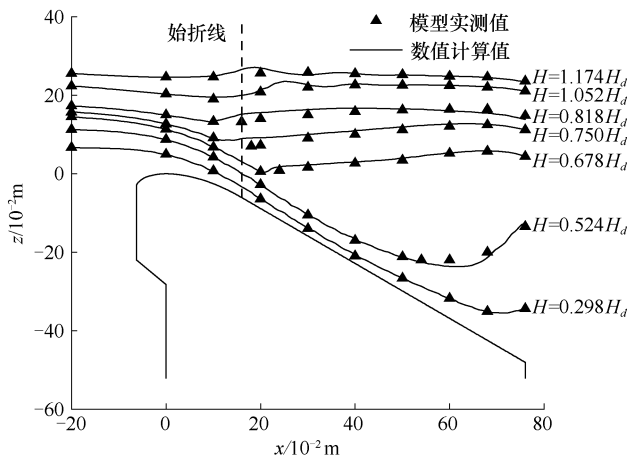


图8 水面线对比

Fig. 8 Comparison of water surface lines

收缩比($\beta=0.300$)较大时急流冲击波流态的流速分布情况如图9(a)所示,表孔水面沿程下降,流速沿程增大,受宽尾墩影响出口附近水深略有增大。出口断面流速方向与堰面基本平行,沿水深流速大小较一致。将该类流态称为水面沿程下降的急流冲击波流态。

收缩比($\beta=0.130$)较小时急流冲击波流态的流速分布情况如图9(b)所示,表孔水面先沿程下降后沿程升高,收缩段整体流速大小分布较均匀, x 方向(顺水流方向)的分速度均为正。受宽尾墩影响,收缩段尾部水面线上翘,中上层流速的方向由俯角逐渐变为仰角,但表孔主流仍以急流流态射流为主。将该类流态称为出口附近水面抬升的急流冲击波流态。

收缩比($\beta=0.100$)过小时水跃壅水流态的流速分布情况如图9(c)所示,收缩段中部纵剖面流速分布明显不均匀,与图9(b)相比流速减小,表

层水体出现滞流,产生水跃旋滚。出口断面各层流速方向基本顺水流向,流速沿水深从下到上逐渐减小。

收缩比 $\beta=0.060$ 时的缓流流态流速分布情况如图9(d)所示,渠道内整体流速与图9(d)相比更小,仅在表孔出口附近形成跌流。

典型流态对应的表孔内水流的沿程弗劳德数 Fr 如图10所示。收缩比($\beta=0.300$)较大时, Fr 先增大后减小,出口附近又平缓增大,表孔流道内均为急流($Fr > 1$)。收缩比($\beta=0.130$)较小时, Fr 亦是先增大后减小,但出口附近急剧增大。在减小段存在急流($Fr > 1$)到缓流($Fr < 1$)的过渡,但跃前 Fr 较小且流态演变平缓,浅表层水体发生微弱的波状水跃[见图9(b)],该波状水跃对表层水体的流动影响不大,表层水体仍较顺畅的流出表孔。收缩比($\beta=0.100$)过小时,在起折点前 Fr 先增大后减小,在折点后 Fr 进一步减小,直至出口附近快速增加。在减小段存在从急流到缓流的演变, Fr 有较明显的突变,发生水跃,表层水体明显旋滚不能顺畅地流出表孔。收缩比 $\beta=0.060$ 时,整个表孔内都为缓流, Fr 自堰顶开始逐渐减小,临近出口快速增大。

综合不同典型流态中轴面流速分布和表孔流道沿程 Fr 的特点,可将宽尾墩表孔内流态分为缓流流态、水跃壅水流态、急流冲击波流态。缓流流态指表孔流道内水流为缓流,沿程 Fr 均小于1的流态;水跃壅水流态指表孔流道内存在急流到缓流的过渡,且表面发生了明显旋滚壅水的流态;急流冲击波流态指表孔流道水流整体为急流,沿程 Fr 均大于1或大部分过流断面 Fr 大于1(仅出口附近 Fr 小于1)的流态。其中,水跃壅水流态和缓流都会显著降低表孔水道水流速度,导致表孔泄流不通畅,表层一定范围内水

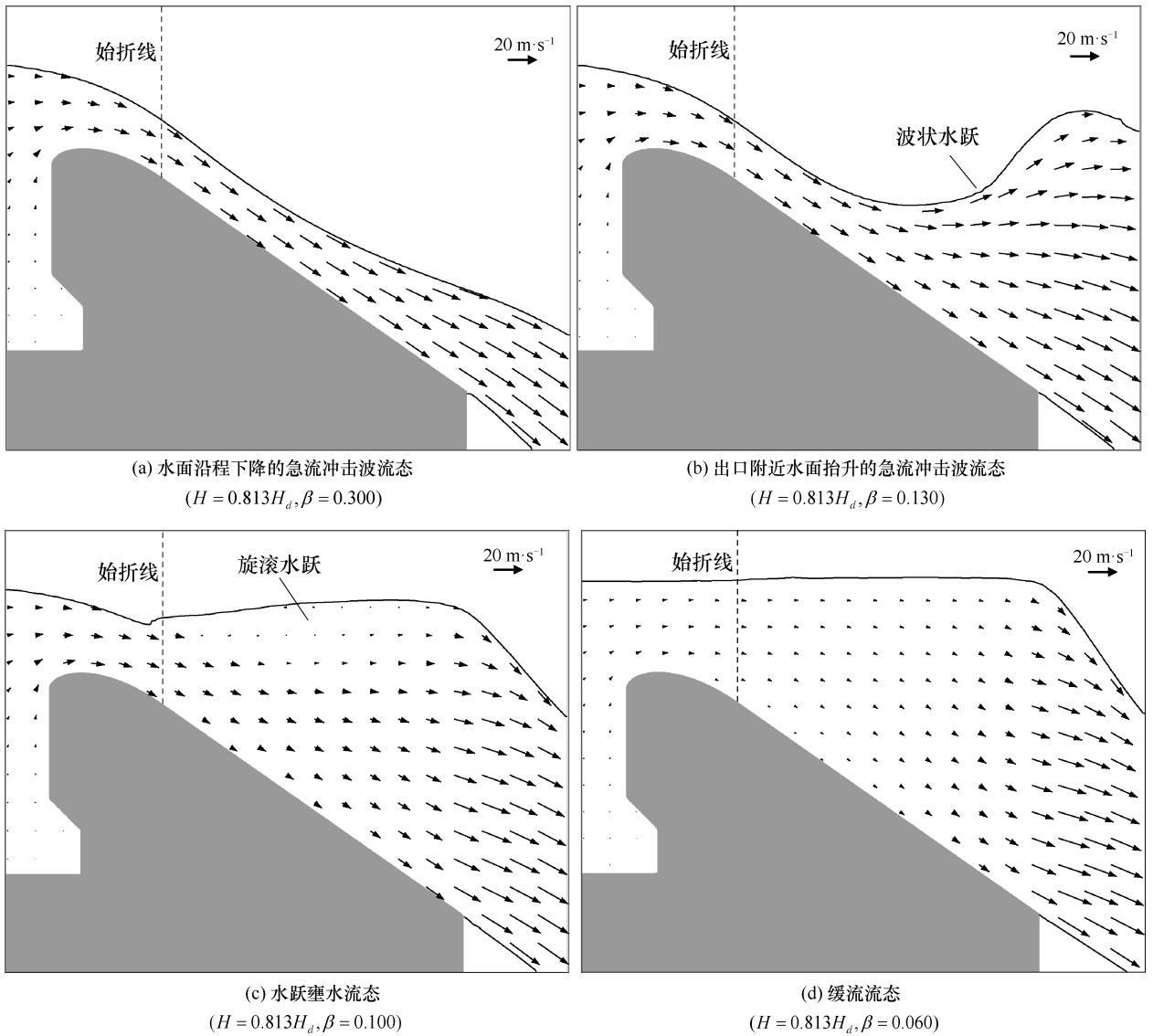


图 9 典型流态的流速分布 ($y=0$ 剖面)

Fig. 9 Flow velocity distribution for different flow patterns

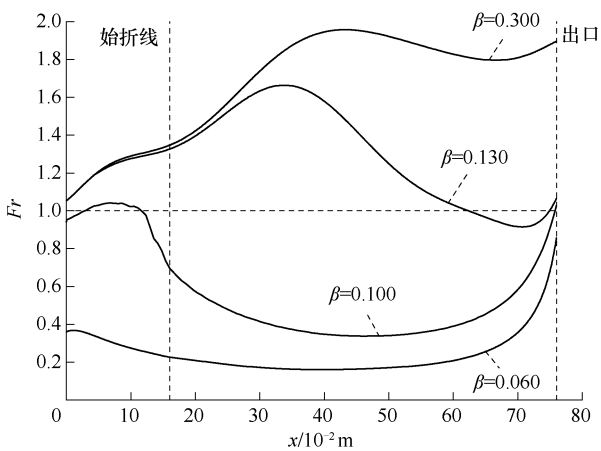


图 10 典型流态的沿程 Fr ($H=0.813H_d$)

Fig. 10 Along-travel Fr for different flow patterns

流纵向流速为 0, 统称为非急流壅水流态, 简称壅水流态。结果显示, 当堰顶水头 $0.813H_d$ 、 $1.000H_d$ 、 $1.084H_d$ 、 $1.174H_d$ 、 $1.265H_d$ 对应的宽尾墩收缩比分别小于 0.130、0.157、0.168、0.178、0.183 时表孔内水流是壅水流态。

宽尾墩壅水流态时泄流量和急流流态泄流量 ($\beta=1.000$) 的对比情况如表 2 所列。由表 2 可知, 表孔内因宽尾墩引起的壅水流态降低了表孔泄流能力, 且收缩比越小、堰顶水头越大时流量减小幅度越大, 所以设计中应避免收缩比过小导致出现壅水流态。

2.2 壅水流态的发生条件

在堰顶水头和宽尾墩其他体型参数相同的情况下, 仅改变宽尾墩收缩比 β , 随着收缩比 β 的减小表孔内流态从冲击波流态变为壅水流态。收缩比存在

表 2 壅水流态泄流量和急流流态泄流量

Table 2 Flow rate in backwater flow and rapid flow

堰顶水头 H/H_d	宽尾墩收缩比及 对应泄流量		急流泄 流量 $/10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	流量差值 $/10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	流量 减幅/%
	收缩比 β	泄流量 $/10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			
0.813	0.100	33.36	35.38	2.02	6.05
	0.110	34.96		0.42	1.19
1.000	0.150	48.24	49.07	0.83	1.73
	0.155	48.39		0.69	1.42
1.084	0.155	53.82	55.79	1.96	3.65
	0.160	54.23		1.55	2.86
1.174	0.170	60.67	63.19	2.52	4.15
	0.172	60.88		2.31	3.79
1.265	0.180	67.38	71.04	3.66	5.43
	0.181	67.73		3.31	4.88

一个临界值 β_c , 当收缩比小于 β_c 时, 表孔内出现壅水流态, 定义 β_c 为临界收缩比。临界收缩比是给定条件(堰顶水头、始折点位置、收缩段长、出口俯角)下, 保证表孔内不出现壅水流态, 出口能缩小到的最小程度。临界收缩比的数值大小是衡量给定条件下, 表孔内可能发生壅水流态的相对难易程度, β_c 越小表孔内越不容易发生壅水流态。

临界收缩比与堰顶水头的关系密切, 通过不断调整收缩比找到了堰顶水头 $0.813H_d$ 、 $1.000H_d$ 、 $1.084H_d$ 、 $1.174H_d$ 、 $1.265H_d$ 堰顶水头对应的临界收缩比 β_c 分别为 0.130 、 0.157 、 0.168 、 0.178 、

0.183 。

定义收缩比 $\beta = \beta_c$ 时, 表孔内流态为临界流态。临界流态如图 11 和图 12 所示, 该流态下自起折点水深逐渐增大, 在出口附近水位急剧壅高, 表层水体动能急剧转化为重力势能, 导致出口表层水流水位高流速低。随着堰顶水头的上升, 最远落水点向上游移动, 横向入水范围逐渐缩窄, 空中水舌有入水落点集中的趋势。脱离表孔后空中射流水体整体做斜下抛运动, 出口表层水体水位高且水平分速度较小, 下层水体水位低且水平分速度较大, 这是导致表层水体和下层水体挑距集中的原因^[21]。

2.3 临界收缩比的计算公式

2.3.1 拟合参数

给定设计水头 H_d 、堰顶与始折点垂直距离 y_k 、收缩段长 L 和出口俯角 θ , 宽尾墩体型基本确定(只剩收缩比没定)。 H_d 和 θ 可确定堰面形状(堰面方程); 无论始折点是在 WES 曲线段堰面还是直线段堰面, 给定 y_k 就能确定始折点位置(y_k 带入堰面方程即可解得 x_k); 收缩段长 L 和出口俯角 θ 可确定始折点与出口的落差。

经分析, 相同堰顶水头条件下, 始折断面的水位和流速主要受 y_k 影响, 水深壅高的相对快慢主要受 L 影响, 沿堰面方向的加速度($g \sin \theta$) 主要受 θ 影响, 收缩段水位主要受 L 和 θ 共同影响。所以, 相同堰

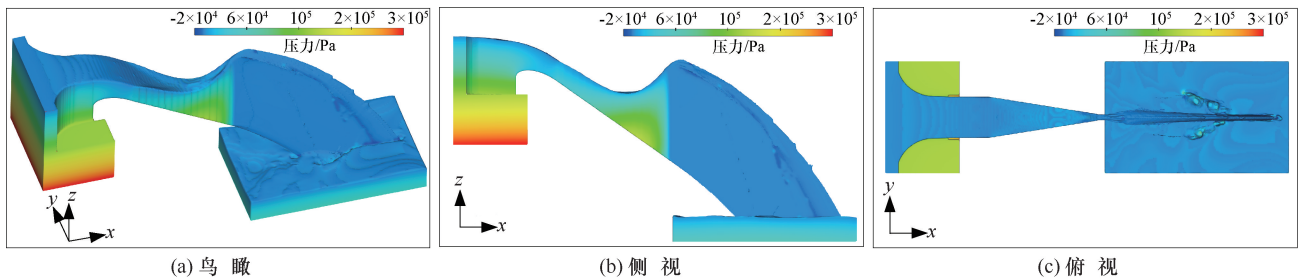


图 11 临界流态($H=0.813H_d$, $\beta=0.130$)

Fig. 11 Critical flow($H=0.813H_d$, $\beta=0.130$)

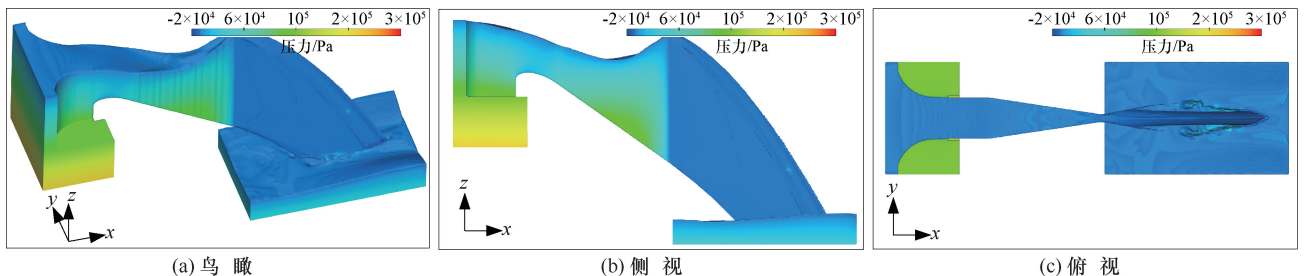


图 12 临界流态($H=1.265H_d$, $\beta=0.183$)

Fig. 12 Critical flow($H=1.265H_d$, $\beta=0.183$)

顶水头下, 临界收缩比 β_c 主要受 H_d 、 y_k 、 L 和 θ 影响, β_c 可用 H_d 、 y_k 、 L 和 θ 简化拟合。 β_c 与堰顶水头 H 也有关系, 所以不同堰顶水头下, β_c 可用 H 、 H_d 、 y_k 、 L 和 θ 简化拟合。简化拟合的体型如图 13 所示。

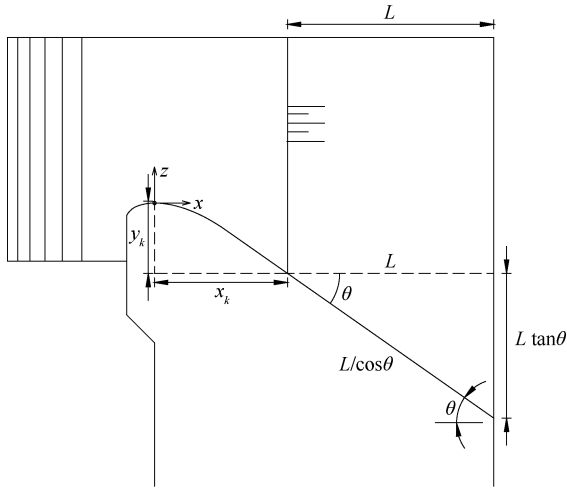


图 13 简化拟合的体型示意

Fig. 13 Simplified fitting figure diagram

在前文的研究基础上, 后续扩大了研究范围 ($0.813H_d \leq H \leq 1.084H_d$ 、 $H_d = 0.2214 \text{ m}$, $0.723H_d \leq \xi_x \leq 2.529H_d$ 、 $0.271H_d \leq \xi_y \leq 1.536H_d$ 、 $2.033H_d \leq L \leq 3.388H_d$ 、 $25^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$), 该研究范围基本包括了常用宽尾墩的体型参数。在常用宽尾墩体型范围内, 研究了临界收缩比与宽尾墩始折点位置、宽尾墩收缩段长和堰面俯角的关系。总共研究了约 360 多种体型工况, 从中找到了共 45 组临界收缩比的试验数据, 其中 $0.813H_d$ 和 $1.084H_d$ 堰顶水头下的临界收缩比试验组数均为 22 组, H_d 、 $1.174H_d$ 和 $1.265H_d$ 堰顶水头下的临界收缩比试验数据各一组。鉴于篇幅有限, 试验工况、数据不在此罗列, β_c 与始折点位置、收缩段长和堰面俯角的关系如下: 在堰顶水头、流道总长、堰面俯角相同的条件下, 临界收缩比随宽尾墩始折点远离堰顶而逐渐增大; 在堰顶水头、始折点位置、堰面俯角相同的条件下, 临界收缩比随宽尾墩收缩段长增大(即出口远离堰顶)而逐渐减小; 在堰顶水头、始折点位置、收缩段长相同的条件下, 临

界收缩比随堰面俯角的增大而逐渐减小; 在堰顶水头、始折点位置、收缩段长、堰面俯角相同的条件下, H_d 差距在约 10% 以内的情况下, 临界收缩比变化较小。

2.3.2 拟合公式

用 $0.813H_d$ 和 $1.084H_d$ 堰顶水头下的试验数据拟合出临界收缩比 β_c 与堰顶水头 H 、堰面曲线定型设计水头 H_d 、收缩起始断面到堰顶的水平距离 y_k 、收缩长度 L 和堰面俯角 θ (以弧度计)的关系如下

$$\beta_c = \frac{3.59(H/H_d)^{0.838}}{(y_k/H_d)^{0.149}(L/H_d + 0.865)(11.326\theta + 1)} \quad (5)$$

拟合公式计算值与试验值的相关系数 R^2 为 0.98, β_c 公式计算值与试验值的对比如图 14 所示。

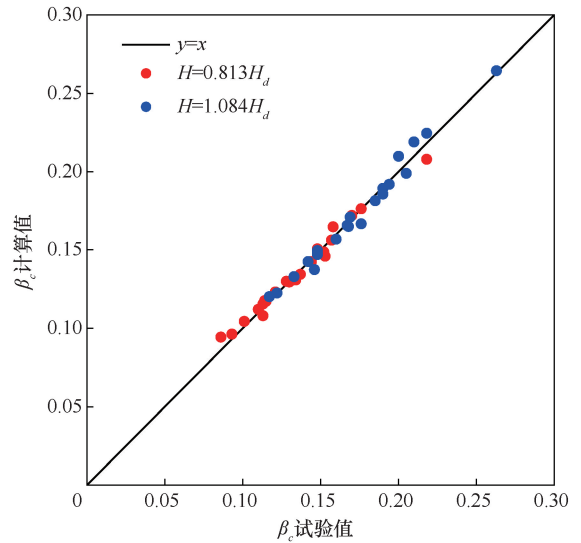


图 14 β_c 公式计算值与试验值的对比

Fig. 14 The comparison between the calculated value of β_c formula and the experimental value

为验证上述临界收缩比计算公式的精度, 将未参与公式拟合的 H_d 、 $1.174H_d$ 和 $1.265H_d$ 水头下的各参数带入到公式中, 临界收缩比 β_c 计算值与试验值对比结果如表 3 所列。可见根据堰顶水头 $0.813H_d \sim 1.084H_d$ 给出的临界收缩比计算公式, 在预测堰顶水

表 3 β_c 计算公式精度的验证

Table 3 β_c calculation formula accuracy verification

H/H_d	H_d/m	y_k/H_d	L/H_d	θ/rad	β_c 试验值	β_c 公式计算值	相对误差/%
1.000	0.2214	0.275	2.710	0.611	0.157	0.154	1.91
1.174	0.2214	0.275	2.710	0.611	0.178	0.176	1.12
1.265	0.2214	0.275	2.710	0.611	0.183	0.188	2.73

头增加至 $1.265H_d$ 时, 计算结果仍然具有较高的精度。

3 讨论结果

收集了锦屏一级水电站^[21]、孟底沟水电站^[12]、

东庄水利枢纽^[19]和白石水电站^[29-30]工程的宽尾墩体型参数及运行水位, 并用公式(5)计算上述工程宽尾墩的临界收缩比, 然后判断该体型是否发生壅水, 并与上述工程水力学试验的情况进行了对比, 公式预测结果均与试验结果吻合, 结果如表4所列。

表4 临界收缩比 β_c 计算公式在实际工程中的应用

Table 4 Application of critical shrinkage ratio β_c calculation formula in practical engineering

序号	工程名称	堰顶水头		宽尾墩体型参数				渠道内是否壅水	公式计算 β_c	公式预测结果
		H_d/m	H/H_d	y_k/H_d	L/H_d	θ/rad	β			
1	锦屏一级电站	11.07	1.084	0.273	2.258	0.611	0.318	否	0.188	正确
2	孟底沟水电站	14.27	1.000	0.920	0.561	0.524	0.270	是	0.368	正确
3		14.27	1.000	0.430	1.402	0.524	0.270	否	0.259	正确
4	东庄水利枢纽	15.50	0.852	0.210	1.466	0.559	0.300	否	0.232	正确
5	白石水电站	15.45	0.819	0.218	1.347	0.611	0.290	否	0.218	正确
6		15.45	1.254	0.003	2.009	0.611	0.290	是	0.453	正确

本文给出的宽尾墩临界收缩比计算公式(5)还能用于分析不同堰顶水头时表孔的流态。以白石水电站表孔为例^[29], 表孔堰面曲线定型设计水头 $H_d = 14.65\text{ m}$, 在模型试验中研究了 $y_k = 3.911\text{ m}$, $L = 20.810\text{ m}$, $\theta = 0.611\text{ rad}$, $\beta = 0.29$ 体型的宽尾墩, 根据公式(5)计算临界收缩比与堰顶水头的结果如图15所示。结果表明, 当该工程表孔堰顶水头增大到 $1.15H_d$ 时, 渠道内开始出现壅水流态, 这与文献[29]中的试验结果一致。考虑到该工程校核洪水水位对应堰顶水头为 $1.254H_d$, 所以宽尾墩收缩比为 0.29 时校核水位表孔流态为壅水流态, 需要对宽尾墩体型进行优化。

4 结论

(1) 高拱坝表孔采用宽尾墩时, 随着收缩比减小, 表孔内水流流速分布和断面沿程 Fr 发生明显变化, 可能出现四类典型流态: 水面沿程下降的急流冲击波流态、出口附近水面抬升的急流冲击波流态、水跃壅水流态和缓流流态。急流冲击波流态对表孔流速大小影响较小, 孔内各层水体均能通畅流出表孔。水跃壅水流态和缓流都会显著降低表孔渠道水流流速导致表孔溢流不畅通, 降低表孔泄流能力, 因此, 表孔体型设计中应避免出现壅水流态。

(2) 随着收缩比变化, 存在一个临界收缩比 β_c 。当宽尾墩收缩比 β 小于临界收缩比 β_c 时, 表孔内出现壅水流态。为避免表孔宽尾墩渠道内出现壅水流态, 高拱坝表孔宽尾墩的收缩比应大于临界收缩比。

(3) 临界收缩比随着堰顶水头的增大而增大, 随着始折点远离堰顶而增大, 随着收缩段长的增大而减小, 随着堰面俯角的增大而减小。给出了临界收缩比 β_c 与堰顶水头 H 、堰面曲线定型设计水头 H_d 、闸墩收缩起点到堰顶的水平距离 y_k 、收缩段长度 L 和堰面俯角 θ 的关系式

$$\beta_c = \frac{3.59(H/H_d)^{0.838}}{(y_k/H_d)^{0.149}(L/H_d + 0.865)(11.326\theta + 1)}$$

经验证, 该公式具有一定的精度和较广的适用范围, 可为高拱坝表孔宽尾墩体型设计提供参考。

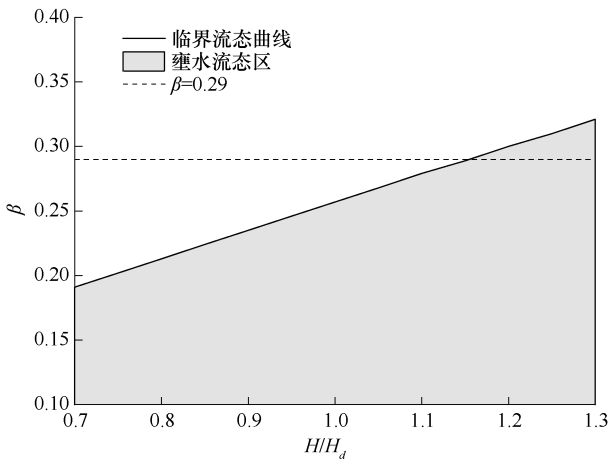


图15 临界收缩比与堰顶水头的关系

Fig. 15 Relationship between critical contraction ratio and head on weir crest

参考文献(References):

- [1] 练继建, 刘丹, 刘昉. 中国高坝枢纽泄洪雾化研究进展与前沿[J]. 水利学报, 2019, 50(3): 283-293.
- LIAN J J, LIU D, LIU F. Research progress and frontiers on flood discharge atomization of Chinese high dam projects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3): 283-293.
- [2] CHUANMING S, CHAO M, BIN M, et al. Impinging pressure and flood discharge atomization in high arch dams with flaring gate piers[J]. Journal of Hydraulic Research, 2022, 60(5): 712-724.
- [3] 孙宁, 张法星, 刘善均, 等. 高拱坝无碰撞泄洪表孔水舌纵向拉伸方法试验研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(5): 100-103.
- SUN N, ZHANG F X, LIU S J. Experimental study on longitudinal stretch of jets of surface outlets in high arch dam without impact of jets in the air[J]. Water and Power Energy Science, 2017, 35(5): 100-103.
- [4] 段文刚, 胡晗, 侯冬梅. 我国特高拱坝坝身泄洪消能技术研究与应用[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10): 93-98.
- DUAN W G, HU H, HOU D M. Research and application of flood discharge and energy dissipation technology for super-high arch dam in China[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2021, 38(10): 93-98.
- [5] 谢省宗, 吴一红, 陈文学. 我国高坝泄洪消能新技术的研究和创新[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 324-336.
- XIE S Z, WU Y H, CHEN W X. New technology and innovation on flood discharge and energy dissipation of high dams in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 324-336.
- [6] 许唯临. 高坝水力学的理论与实践[J]. 人民长江, 2020, 51(1): 166-173.
- XU W L. Theory and practice of high dam hydraulics[J]. Yangtze River, 2020, 51(1): 166-173.
- [7] 谢鑫, 刁明军, 杨思远. 收缩比对非对称窄缝挑坎水力特性的影响[J]. 四川水力发电, 2024, 43(1): 1-5.
- XIE X, DIAO M J, YANG S Y. Effect on shrinkage ratio on hydraulic characteristics of axymmetric narrow slit ridge[J]. Sichuan Hydro Power, 2024, 43(1): 1-5.
- [8] 张建民. 高坝泄洪消能技术研究进展和展望[J]. 水力发电学报, 2021, 40(3): 1-18.
- ZHANG J M. Hydraulics of high-speed flows: Recent achievements and future outlook[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(3): 1-18.
- [9] 王莉, 邓迎, 夏叶青. 不对称宽尾墩在隔河岩枢纽中的应用[J]. 人民长江, 2004(9): 18-19.
- WANG L, DENG Y, XIA Y Q. Application of asymmetric wide-tailed pier in Geheyan Project[J]. Yangtze River, 2004(9): 18-19.
- [10] 王继敏, 郑江. 锦屏一级水电站工程建设重大关键技术研究与实践[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 12-20.
- WANG J M, ZHENG J. Research and practice on the key technologies in the construction of Jinping I Hydropower Station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 12-20.
- [11] 张曜, 尹进步, 吴西杰, 等. 某水电站泄洪底孔消能工体型优化[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(4): 403-409.
- ZHANG Y, YIN J B, WU X J, et al. Shape optimization of energy dissipation structure in flood discharge bottom orifice of hydropower station[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(4): 403-409.
- [12] 补金梓, 邓军, 刘文. 宽尾墩对高拱坝表孔泄流能力的影响研究[J]. 人民长江, 2020, 51(S1): 219-222.
- BU J Z, DENG J, LIU W. Study on effect of wide tail piers on the discharge capacity of surface hole in high arch dams[J]. Yangtze River, 2020, 51(S1): 219-222.
- [13] 尹进步. 宽尾墩消能技术的工程应用与研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(2): 1-14.
- YIN J B. Engineering application and research progress on energy dissipation technology with flaring gate pier[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022, 20(2): 1-14.
- [14] 王英奎, 廖仁强, 江春波. 高拱坝水垫塘消能机理及水力学参数研究进展[J]. 人民长江, 2015, 46(8): 40-43.
- WANG Y K, LIAO R Q, JIANG C B. Research progress on energy dissipation mechanism and hydraulics characteristics of plunge pool in high arch dam[J]. Yangtze River, 2015, 46(8): 40-43.
- [15] 李福田, 刘沛清, 许唯临, 等. 高拱坝表孔宽尾墩对泄洪能力影响的试验研究[J]. 水利学报, 2003(11): 43-47.
- LI F T, LIU P Q, XU W L, et al. Experimental study on effect of flaring piers on weir discharge capacity in high arch dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(11): 43-47.
- [16] 朱新元. 高拱坝表孔宽尾墩: 深孔窄缝挑坎联合消能试验研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- ZHU X Y. Experimental investigation on energy dissipation by flaring gate piers on spillways and slit-type bucket on bottom level outlets in high arch dams[D]. Chengdu: Sichuan University, 2004.
- [17] 阮小蓉. 宽尾墩在溢流坝面上的合理位置[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- RUAN X R. The location of flared gate piers on overflow dam[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [18] 刘金星. 东庄水利枢纽无碰撞泄洪消能体型优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- LIU J X. Optimal study on flood discharging and energy dissipation without impact of jets in air of Dongzhuang Project[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [19] 练继建, 桑林瀚, 缙文娟, 等. 高拱坝表孔宽尾墩体型参数对泄流能力的影响[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3): 1-7.

- LIAN J J, SANG L H, GOU W J, et al. Effects of flaring gate piers with different shape parameters on discharge capacity of surface spillway in a high arch dam[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2018, 38(3): 1-7.
- [20] TIAN Z, WANG W, BAI R, et al. Effect of flaring gate piers on discharge coefficient for finite crest-length weirs [J]. *Water*, 2018, 10(10): 1349-1349.
- [21] 张公平, 周钟, 唐忠敏. 窄河谷高拱坝收缩式表孔体型研究[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(9): 71-79.
- ZHANG G D, ZHOU Z, TANG Z M. Study on shape of contracted surface outlet on high arch dam [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(9): 71-79.
- [22] 钟杰, 张法星, 甄燕, 等. 燕尾坎在忠玉水电站高拱坝表孔上应用研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(S2): 268-274.
- ZHONG J, ZHANG F X, ZHEN Y, et al. Application of partial-flip bucket on overfall spillways of high arch dam in Zhongyu Hydropower Station[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(S2): 268-274.
- [23] 刘培豪, 孙亮, 韩松林, 等. 高拱坝坝身泄洪及表孔体型优化数值模拟[J]. *水道港口*, 2023, 44(2): 217-224.
- LIU P H, SUN L, HAN S L, et al. Numerical simulation of flood discharge and surface holes shape optimization of high arch dam[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2023, 44(2): 217-224.
- [24] 刘健. 宽尾墩收缩比对高拱坝表孔影响的数值模拟研究[J]. *吉林水利*, 2019(9): 28-30.
- LIU J. Numerical simulation study on the influence of wide tail piers contraction ratio on surface hole of high arch dam [J]. *Jilin Water Resources*, 2019(9): 28-30.
- [25] 王继敏, 杨弘. 锦屏一级水电站泄洪消能关键技术研究[J]. *人民长江*, 2017, 48(13): 85-90.
- WANG J M, YANG H. Research on key technology of flood discharge and energy dissipation for Jinping I Hydropower Station[J]. *Yangtze River*, 2017, 48(13): 85-90.
- [26] 陈悦婷, 汤方平, 张校文, 等. 大型立式轴流泵水力模型导叶改型及试验验证[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(7): 655-662.
- CHEN Yueting, TANG Fangping, ZHANG Xiaowen, et al. Modification and experimental verification of guide vanes hydraulic model for large vertical axial-flow pumps[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023, 41(7): 655-662.
- [27] 卿启维, 邓方雄, 李文斌, 等. 喷嘴射流径向偏移斗叶对冲击式水轮机稳定性的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(12): 1283-1289.
- QING Qiwei, DENG Fangxiong, LI Wenbin, et al. Effect of radial offset bucket blades of nozzle jet on stability of Pelton turbines[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023, 41(12): 1283-1289.
- [28] 赵道利, 邓晓飞, 孙维鹏, 等. 导水叶栅对冲击式水轮机喷射机构流动特性的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(11): 1081-1087.
- ZHAO Daoli, DENG Xiaofei, SUN Weipeng, et al. Influence of guide vane on flow characteristics of Pelton turbine injector [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023, 41(11): 1081-1087.
- [29] 曹娜. 尾墩体型参数对表孔水力特性的影响研究[J]. *水利技术监督*, 2018, (2): 90-93.
- CAO N. Effect of tail pier body shape parameters on hydraulic characteristics of surface holes [J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2018, (2): 90-93.
- [30] 许拯民, 莫修旭, 雷冠军, 等. 大凌河白石水库生态调度放流对策模型研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(8): 125-133.
- XU Z M, MO X X, LEI G J, et al. Study on the ecological regulation and release countermeasure model of Baishi Reservoir in Dalinghe River[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(8): 125-133.

(责任编辑 王璐)