

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2009. 02. 003

大变幅相对淹没度下冲沙闸的水力特性试验

杨 健¹, 万继伟¹, 吴 桐¹, 牛争鸣¹, 乔明秋², 韩 立², 高永辉², 安宇天²

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 北京勘测设计研究院, 北京 100024)

摘要 通过陕西汉江旬阳水电站冲沙闸的单体水工模型试验, 研究大泄量、中低水头、大单宽和大变幅相对淹没度条件下, 冲沙闸在消力池、护坦及基岩 3 种不同下游消能形式时的水力特性, 特别是高淹没条件下的泄流能力设计、计算和大变幅相对淹没度 h_s/H_0 条件下的运行方式为泄洪或排沙时下游消能形式的选择。当泄洪时, 下游水位高, h_s/H_0 大, 护坦和基岩消能形式较优, 综合流量系数 m' 在 0.298 ~ 0.329 之间; 当排沙时, h_s/H_0 变幅大, 适宜采用消力池消能形式。

关键词 冲沙闸 大变幅相对淹没度 水力特性 消能形式

中图分类号 TV66 ;TV135 **文献标识码** A **文章编号** :1006-7647(2009)02-0009-04

Hydraulic characteristics experiment on scouring sluice under relative submergence degree of large variable head//YANG Jian¹, WAN Ji-wei¹, WU Tong¹, NIU Zheng-ming¹, QIAO Ming-qiu², HAN Li², GAO Yong-hui², AN Yu-tian² (1. *Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi 'an University of Technology, Xi 'an 710048, China*; 2. *Beijing Investigation, Design and Research Institute, Beijing 100024, China*)

Abstract : A single hydraulic model test of the scouring sluice of the Xunyang Hydropower Station on the Hanjiang River in Shaanxi Province identified the hydraulic characteristics of the scouring sluice under three different energy dissipaters. Stilling basin, apron and bedrock were studied under the condition of large discharge, middle-low water head, large unit discharge and relative submergence degree of large variable head. In particular, the discharge capacity design and calculation with a high submergence degree is analyzed, and the election of energy dissipaters in the lower reaches in the operation mode of flood discharge and sediment ejection operational mode with a relative submergence degree (h_s/H_0) of large variable head is analyzed. During flood discharge, the water level is high and the value h_s/H_0 is large, the energy dissipater of bedrock is better, and the aggregate discharge coefficient m' ranges from 0.298 to 0.329. Also, the variable head of the submergence degree h_s/H_0 is large, and the energy dissipater of the stilling basin is more appropriate.

Key words : scouring sluice ; relative submergence degree of large variable head ; hydraulic characteristics ; energy dissipater

我国拥有十分丰富的中低水头水力资源,但是利用并不充分。据不完全统计,我国经过规划的水头在 25 m 以下的水电站装机容量总计约 13 400 MW,年发电量仅为 600 亿 kW·h。这类水电站多具有中低水头、大流量以及泄水建筑物运行时上下游水位落差变幅大等特点^[1]。按和谐水利水电工程的建设理念,尽量不改变天然河道的水流特性,减少移民与土地淹没成为这类水利水电工程建设的基本原则之一。研究大泄量、中低水头、大单宽和大变幅相对淹没度条件下开敞式低实用堰的冲沙闸水力特性,解决汛期大泄流量带来的泄洪消能问题和正常运行时的消能防冲问题是非常必要的^[2]。高淹没条件下的泄流能力设计、计算和大变幅相对淹没度条件下的下游消能形式更具有研究价值。笔者结合陕西汉江旬阳水电站冲沙闸的单体模型试验开展研究。

1 工程简介

旬阳水电站是汉江干流规划的 7 个梯级中的第 5 级,位于陕西省旬阳县城南约 2 km 处。旬阳水电站为百年设计 ($Q = 27\,400\text{ m}^3/\text{s}$)、千年校核 ($Q = 32\,600\text{ m}^3/\text{s}$),相应水位分别为 240.25 m 和 243.28 m,总库容为 3.9 亿 m^3 ,装机容量为 320 MW,年均发电量为 8 亿 kW·h,电站保证出力为 48 MW,水量利用系数为 81%。旬阳水电站枢纽工程设计主要建筑物包括左岸非溢流坝段、安装场、主机间(下游侧布置副厂房)、4 孔冲沙闸、左 3 孔泄洪闸、右 4 孔泄洪闸及右岸非溢流坝段等,平面布置如图 1 所示。根据下游消能形式的不同,冲沙闸可分为消力池方案、护坦方案和基岩方案等,通过不同的运行条件进行选择,冲沙闸消力池方案单体剖面如图 2 所示,与其

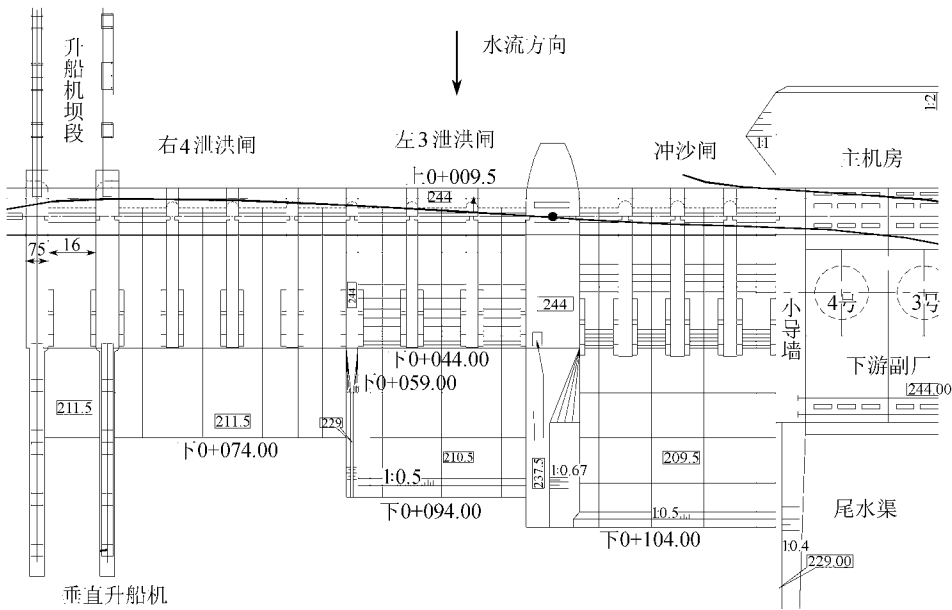


图1 旬阳水电站平面布置示意图

相比,护坦方案的护坦高程抬至213.50 m,基岩方案的基岩高程为 210.00 m,后均无消力坎,剖面图见文献[3]。

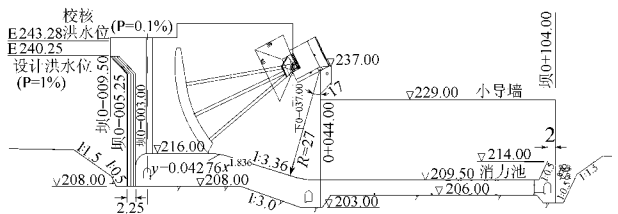


图2 设计方案冲沙闸剖面图(消力池方案)

2 模型设计与量测

试验采用单体断面模型,即 1 个完整闸孔(含闸墩)和两侧 1/4 闸孔,模型按重力相似准则设计,模型比尺为 1:50,用有机玻璃制作。主要的试验工况见表 1。

表1 泄洪冲沙闸模型试验主要工况

试验 工况	洪水标准	库水位/ m	下游 350 m 处水位/m	设计泄 流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	常遇洪水前	233.00	222.37	2 227.53
2	常遇洪水前	233.00	225.44	2 227.53
3	常遇洪水 ($P = 50\%$)	233.00	228.82	2 227.53
4	5 年一遇 ($P = 20\%$)	233.00	231.60	2 227.53
5	20 年一遇 ($P = 5\%$)	236.27	235.51	2 721.11
6	50 年一遇 ($P = 2\%$)	239.38	238.43	3 202.53
7	100 年一遇 ($P = 1\%$)	240.25	239.48	3 368.09
8	1 000 年一遇 ($P = 0.1\%$)	243.28	242.10	3 898.20

3 试验成果分析

3.1 流态与水面线变化规律

冲沙闸堰型为开敞式低实用堰,下游水位对水流流态影响很大。图 3 为冲沙闸在不同下游消能形

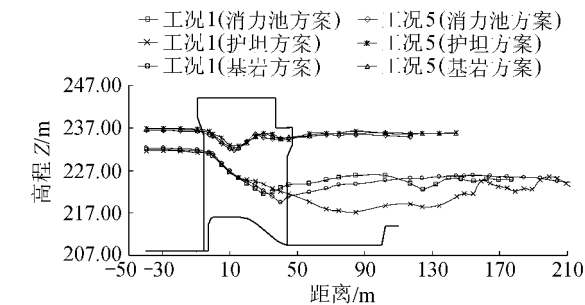


图3 下游不同消能形式和典型工况下水面线沿程变化式、典型工况时的水面线沿程变化,以最不利工况(工况 1)和典型工况(工况 5)进行比较。

当流量小、下游水位较低时,冲沙闸闸室进口侧收缩明显,在闸室末端处水位波动较大,消力池(护坦或基岩)内流态为底流流态,流态受堰面体型和下游消能形式的影响比较大。消力池方案和基岩方案因池内底板高程相对较低,在同一下游水位时池内水位相对较高,形成淹没水跃,跃首位置来回摆动至弧门支座处 护坦方案底板抬高,水流呈急流下泄,形成远驱水跃,池内水深小,水流流速大,波动范围长。3 种下游消能形式流态具有共同特性:水面波动大,水流紊动剧烈,掺有大量白色气泡,水流流速大,下游河床水面波动较大,并产生二次水跃,河床被明显冲刷。

随着流量增大及下游水位升高,流态受到堰面体型和下游消能形式的影响逐渐减小,闸室进口侧收缩不明显,闸室内水面跌落随之减小,3 种下游消能形式在堰后均为淹没水跃,其跃首位置依旧处在弧门支座处,在闸室末端处水位波动较小,闸室、消力池(护坦或基岩)及下游河床段水流波动减小,流速降低并逐渐趋向平稳。

当上游水位至 231 ~ 232 m、上下游水位差小于 1.26 m 时,闸室内的水面跌落小,消力池(护坦或基岩)内流态处于底流和面流过渡状态,池内及下游河床水流流态波动较小,流速较低。

随着流量进一步增大,下游水位继续抬高,消力池(护坦或基岩)水垫高度增加,水垫的顶托作用增强,池内水流转为波状水跃面流流态,堰面体型和下游消能形式对流态、水面线影响减小。当上游水位至 235 ~ 236 m、上下游水位差小于 1.05 m 时,弧门支座处的锚块开始与水接触。当上游水位至设计洪水位($P = 1\%$)以上,上游受到牛腿的阻水影响,在闸室内存在一定的水位落差,锚块阻水变得明显,出现壅水现象并在闸室末端跌落,与池内水流汇合,使局部水面产生小幅度波动,但流态较平稳^[4-6]。

冲沙闸的流态与水面线观测结果表明,下游水位较高时,堰型和下游消能的形式对流态、水面线和泄流能力的影响较小,堰后为波状水跃面流流态,牛腿、锚块阻水明显,在闸室前后形成前壅后跌、局部波动的水面变化,并对泄流能力产生较大的影响;下游水位适中时,堰后为典型的淹没水跃流态,下游消能形式与淹没度对流态和泄流能力有一定的影响;下游水位较低时,堰后形成远驱水跃,下游消能形式对流态和消能有明显的影响。

3.2 泄流量变化规律

在实际设计中,冲沙闸的泄流能力采用实用堰流量公式^[7] $Q = m'nb\sqrt{2gH_0^{3/2}}$ 进行计算(其中综合流量系数 $m' = \varepsilon_1\sigma_s m$, ε_1 为侧收缩系数, σ_s 为淹没系数, m 为流量系数)。 m' 需按运行方式的不同进行选择。

从冲沙闸在不同下游消能形式下单宽流量与相对淹没度 h_s/H_0 的关系所得到的 m' 的变化规律(图 4)可以看出,当单宽流量相同、下游水位较低时(工况 1 ~ 4), h_s/H_0 随下游水位的上升而增大, m' 随之减小。消力池方案和基岩方案的 m' 与 h_s/H_0 的关系曲线基本相同,堰后为典型的淹没水跃流态, h_s/H_0 在 0.387 ~ 0.766 之间时 m' 的取值范围为 0.377 ~ 0.391;护坦方案的 h_s/H_0 在 0.400 ~ 0.660 时,堰后为远驱水跃流态, m' 变幅较大,取值在

0.375 ~ 0.404 之间,随着下游水位的提高,堰后流态转换为淹没水跃。3 种不同的下游消能形式在 h_s/H_0 为 0.766 ~ 0.890 时,堰后处于淹没水跃与波状水跃过渡状态, m' 变幅大,约在 0.329 ~ 0.377 之间, h_s/H_0 与 m' 的关系曲线均不相同。 m' 变幅大表明堰型和下游消能形式对泄流能力的影响较大。

当单宽流量增大、下游水位较高时(工况 5 ~ 8), h_s/H_0 基本相同,综合流量系数 m' 随之减小,3 种下游消能形式下的 m' 与 h_s/H_0 的关系曲线趋势基本相同,表明下游水位较高,堰型和下游消能形式对泄流能力的影响较小。 h_s/H_0 在 0.889 ~ 0.934 之间时, m' 约为 0.298 ~ 0.329,设计时可根据泄洪、排沙等具体运行方式选择相应的 m' 。

3.3 时均压力

文献[3]进行了冲沙闸不同下游消能形式和典型工况时堰面及底板时均压力的对比。由测量结果可见,冲沙闸在下游水位低、相对淹没度 h_s/H_0 较小的工况中,压力受堰面体型和下游消能形式的影响较大,3 种下游消能形式的压力值存在明显的差异,消力池方案和基岩方案的闸室进口底板圆弧段及堰面凸曲线段因流速增大,受离心力影响,致使压力大幅度地减小,但压力分布曲线光滑连续,在闸室堰面凸曲线段上出现最小值,消力池方案在池内的压力比基岩方案的大。护坦方案则因池内底板抬高,水深较浅,流速相对较大,池内压力值明显小于其他 2 种方案,压力曲线没有出现突变,分布合理,最小值出现在护坦底板中部。消力池方案压力分布明显好于其他 2 种方案。

随着流量增大及下游水位升高,同一部位的压力逐渐增大,当 h_s/H_0 达到 0.89 以上时,3 种下游消能形式的压力分布趋势基本相同,分布合理,同一部位的的压力值相差不大。表明在下游水位较高时,不同堰面体型和下游消能形式对压力分布的影响较小。

3.4 流速分布和河床冲刷

由试验测量结果可知冲沙闸消力池方案和基岩方案最大流速分别在 13.93 ~ 14.28 m/s 和 12.16 ~ 13.65 m/s 范围,出现在低水位工况(即工况 1、工况 2)的闸室堰面凸曲线段(坝 0+015.00 m)因护坦方案池内底板抬高至 213.5 m,在小流量、低水位工况时闸室内水面跌落较大,水流为远驱水跃,流速值明显大于其他 2 种方案,最大流速值后移,移至闸室后护坦内(坝 0+044.00 ~ 0+114.00 m),最大流速在 16.08 ~ 16.57 m/s 范围,断面平均流速达 15 m/s 左右,且至下游河床内的水流流速仍然较大,对河床有明显的冲刷,以上各方案流速已远大于抗冲流速(3.5 ~ 4.5 m/s)。3 种下游消能形式闸室出口后水

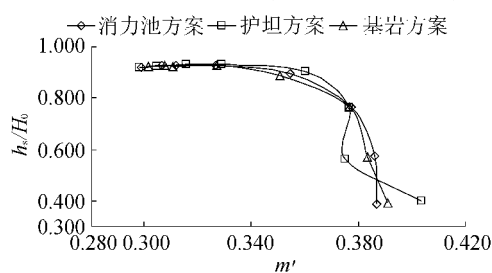


图 4 下游不同消能形式 m' 与 h_s/H_0 的关系

面下回流区的范围均约在坝0+040.00~0+74.00 m范围内,最大回流流速约在1.71~3.57 m/s之间,在不同下游消能形式下工况1断面流速分布对比如图5所示。

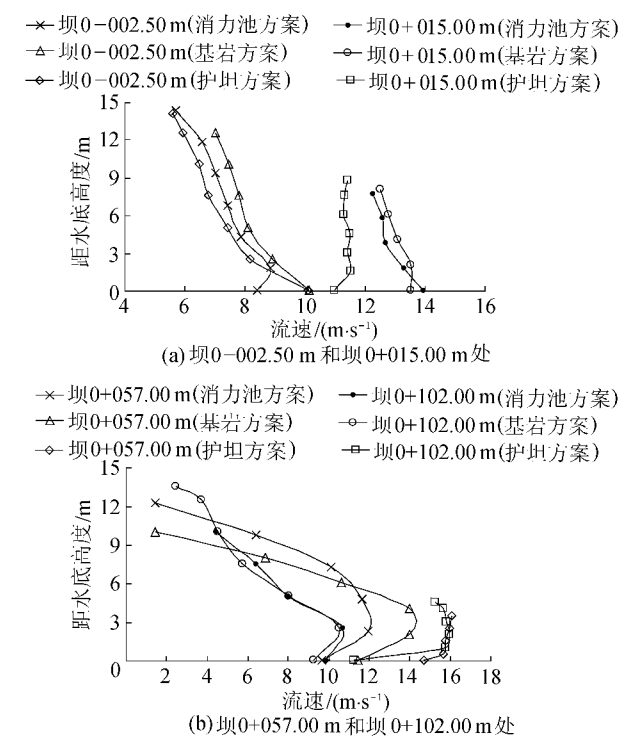


图5 不同的下游消能形式下工况1断面流速分布对比

工况1~3的流量小、 h_s/H_0 较小,冲沙闸3种下游消能形式的闸前水流流速值较小且分布较均匀,闸室内垂直流速沿水深方向为减小趋势,至临近水面附近流速最小,闸室后的池中流速沿水深方向先增大、后减小,至临近水面附近流速最小,甚至出现回流,流速值小于零,其最大流速一般在水层中间,池内的底部流速较大,随水流至下游河床其流速也较大,对河床有明显的冲刷。消力池方案的消力池末端底部流速在8.28~10.66 m/s之间,比河床基岩的抗冲流速(3.5~4.5 m/s)大,冲刷最低点位于工况1的坝0+155.00 m处,最大冲深为9.12 m,冲刷范围在坝0+104.00~0+210.00 m之间;基岩方案的基岩末端底部流速在7.14~10.52 m/s之间,冲刷最低点位于工况1的坝0+140.00 m处,最大冲深为12.8 m,冲刷范围在坝0+104.00~0+190.00 m之间;护坦方案的护坦末端底部流速在9.44~15.76 m/s之间,冲刷最低点位于工况1的坝0+184.00 m处,最大冲深为5.625 m,冲刷范围在坝0+114.00~0+290.00 m之间,冲刷距离较长。表明在 h_s/H_0 较小的情况下,3种不同的下游消能形式中消力池和护坦是在原地形上开挖后浇筑混凝土,因此抗冲刷能力强,不易被破坏,但护坦后的冲刷距离长,对下游原河道破坏范围大,不宜选择;基

岩方案在原地形基础上开挖平整,抗冲流速明显低于池内底部流速,容易遭受冲刷破坏。因此,从流速和冲刷方面比较,消力池方案为最佳选择。

随着流量增大及下游水位升高, h_s/H_0 至0.89以上,冲沙闸内流速分布基本趋于均匀且流速值较小,池内底部流速与河床基岩的抗冲流速相差不大,对下游河床不产生明显冲刷。

通过以上对比分析可知,3种下游消能形式的流速分布与对河床的冲刷因 h_s/H_0 和下游水位的高低有很大差异,具体设计时应充分考虑其运行方式,选择合理的下游消能形式。

4 结 论

对中低水头、大单宽流量以及 h_s/H_0 变幅大,不同堰型和下游消能形式的冲沙闸进行试验研究,结果表明:①从流态、泄流量变化规律、时均压力、流速及河床冲刷等水力特性分析可知,当流量小、下游水位较低、 h_s/H_0 较小时,不同堰型与消力池、护坦和基岩3种下游消能形式对各水力特性有明显的影响,各值相差较大,具体设计时应充分考虑其运行方式,选择合理的下游消能形式;当流量增大、下游水位较高、 h_s/H_0 至0.89以上时,各水力特性基本相同,堰型的影响较小,消力池、护坦和基岩3种下游消能形式均是合理可行的。②当运行方式主要用于泄洪,泄流量大、下游水位高、 h_s/H_0 较大时,3种下游消能形式均可行,但从经济、施工方面考虑,护坦和基岩消能形式更优,在泄流量设计时 m' 在0.298~0.329之间选择;当运行方式主要用于排沙时,一般在大变幅 h_s/H_0 运行情况下使用,从各水力特性比较中看出,消力池方案的水力特性相对较好。

参考文献:

- [1] 吕欣欣.低水头大流量厂坝联合泄洪消能流场的研究[D].西安:西安理工大学,2007.
- [2] 黄秋君,吴建华.收缩式消能工的研究现状及进展[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(2):219-223.
- [3] 牛争鸣,杨健.陕西汉江旬阳水电站冲沙闸水工模型试验报告[R].西安:西安理工大学水力学研究所,2007:1-2.
- [4] 郭子中.消能防冲原理与水力设计[M].北京:科技出版社,1982.
- [5] 季永兴,卢永金,刘桦.苏州河河口水闸下卧式闸门消能防冲水力学问题[J].水利水电科技进展,2007,27(S1):56-59.
- [6] 李建中,宁利中.高速水力学[M].西安:西北工业大学出版社,1994:249-255.
- [7] 吴持恭.水力学[M].3版.北京:高等教育出版社,2003:316.

(收稿日期:2008-06-10 编辑:高建群)