第32卷第2期 水资源与水工程学报 Vol. 32 No. 2
2021年 4月 Journal of Water Resources & Water Engineering Apr. ,2021

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.02.20

# 黄池沟配水枢纽分水池侧槽退水道水力特性试验研究

他金城, 谭立新, 张宗孝
(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘　要**: 结合黄池沟配水枢纽对分水池侧槽退水道的设计要求,通过水工模型试验对侧槽退水道的水力特性进行了研究,测量了退水道水流流速、压强、水深等水力学参数,对侧堰过流能力、水面线、陡坡段水流空化及消力池流态进行了分析评价。结果表明:设计流量下侧堰满足过流能力要求,边墙高度满足过流水深要求;秦岭隧洞不会出现明满流交替现象;陡坡段受空化水流破坏的可能性较小;消力池流态差,大流量时不满足水跃消能要求,建议通过进一步的模型试验来重新设计消力池。

**关键词**: 侧槽退水道; 水力特性; 过流能力; 水流空化; 消力池; 黄池沟配水枢纽
**中图分类号**:TV651.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1672-643X(2021)02-0141-05

# Experiments on the hydraulic characteristics of the side channel spillway of the water allocation pool in Huangchigou Water Distribution Hub

**TA Jincheng, TAN Lixin, ZHANG Zongxiao**
(*State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048, *China*)

**Abstract**: Based on the design requirements of the side channel spillway of the water allocation pool in Huangchigou Water Distribution Hub, the hydraulic characteristics of the side channel spillway was investigated through hydraulic model tests. The hydraulic parameters including flow velocity, pressure and water depth were measured, based on which the conveyance capacity of the side weir, water surface profile, cavitation of the steep slope flow and flow pattern of the stilling basin were analyzed. The results show that the conveyance capacity of the side weir under the designed discharge meets the requirements, as well as the height of the side wall. The phenomenon of alternating pressure and non-pressure flow will not occur in the Qinling tunnel. The steep slope is unlikely to be damaged by cavitation. The flow in the stilling basin doesn't meet the requirements for the dissipation of hydraulic jumps when the flow rate increases. It is recommended that further model tests should be carried out to redesign the stilling basin.

**Key words**: side channel spillway; hydraulic characteristics; conveyance capacity; flow cavitation; stilling basin; Huangchigou Water Distribution Hub

## 1　研究背景

溢洪道为水利工程重要的泄水建筑物,在安全泄洪中发挥着极为重要的作用[1-6],侧槽溢洪道作为溢洪道的一种,在中小型水利工程中得到广泛应用。据统计,浙江省和陕西省的中小型水库中,有近一半采用侧槽溢洪道形式[7],为此,专家学者们对侧槽溢洪道开展了大量的研究,取得了丰富的成果,而水工模型试验在工程设计和优化研究中起到了十分重要的作用[8-10]。为了提出适合金村水库工程的最佳溢洪道布置方案,杜跃亭等[11]依托模型试验,对"L"形和"I"形侧槽式溢洪道进行了研究,为工程优化设计提供了依据;为了改善前坪水库溢洪道进水渠左、右岸导墙前部水流横向偏流流态,朱翠民等[12]对溢洪道进口右侧导墙型式进行了一系列的优化试验,优化后的侧导墙方案水流流态有了较大的改善。此外辅以数值计算的研究也取得了丰富的成果[13-15],石胜友等[16]通过数值计算针对某水库工程侧槽式溢洪道方形消力竖井因断面尺寸和深度较小导致宣泄校核洪水时泄洪洞进口段流态恶劣

**收稿日期**:2020-08-03;　**修回日期**:2020-11-23
**基金项目**:陕西省自然科学基础研究计划项目(2019JLZ-16)
**作者简介**:他金城(1993-),男,甘肃永靖人,硕士研究生,主要从事水工水力学及多相流数值模拟研究。

的问题，进行了消力井的设计方案优化研究。水流空化空蚀一直是威胁溢洪道结构安全的重要因素[17]，为探究达克曲克水电站表孔溢洪道泄槽是否存在空化空蚀问题，颜婷等[18]通过理论计算与实际分析发现在施工时按要求控制不平整度可以有效避免空化空蚀。

黄池沟配水枢纽是引汉济渭工程输配水工程的重要组成部分。枢纽主要由秦岭输水隧洞、分水池、侧槽退水道、黑河供水连通隧洞及南、北干线组成，枢纽布置图见图1。

秦岭隧洞的来水量变幅大且变化非常频繁，来水规律性差。根据引汉济渭工程设计，来水一旦进入配水枢纽后保证全部分配到南、北干线，尽量做到不弃水或少弃水。但黄池沟配水枢纽因分水池容量太小，调节能力差，即来多少水就分多少水，一旦南、北干线出现事故或多闸门控制不当，将产生大量弃水，由此带来的泄流安全问题及其影响就成为黄池沟配水枢纽必须妥善解决的关键技术问题之一。

侧槽退水道承担着黄池沟配水枢纽的泄洪任务，保证将多余的弃水顺利地排向下游。侧槽退水道在分水池左侧，由侧堰、侧槽段、平面弯道箱涵段、陡坡箱涵段、消力池及海漫段组成，侧堰由中墩分隔为两孔，溢流堰为曲线型实用堰，堰顶高程514.00 m，顶部设置钢坝闸，钢坝闸顶部高程515.00 m。设计水位514.88 m时，钢坝闸门正常挡水，当出现紧急情况需要泄流，下泄流量不大于47 $m^3/s$，分水池水位低于516.20 m时，钢坝闸门顶部过流，当下泄流量大于47 $m^3/s$、分水池水位高于516.20 m时，钢坝闸门开启泄流，最大下泄量70 $m^3/s$。侧槽退水道能否顺利宣泄弃水是工程设计考虑的首要问题，同时由于泄流可能使侧堰产生一定程度的淹没泄流而增加分水池水位，从而引发秦岭隧洞明满流交替的复杂流态，所以避免秦岭隧洞发生闷孔现象对工程而言也很重要，此外，消力池作为退水道消能设施，其流态特征对于工程运行也同样重要。因此，本文以黄池沟配水枢纽分水池侧槽退水道为研究对象，针对以上侧槽退水道设计要点和可能存在的问题通过模型试验进行分析研究，为退水道的优化设计和安全运行提供依据。

## 2 试验系统及试验工况

水工整体模型按重力相似准则设计，几何比尺为1∶15，为正态模型，流速比尺为3.873，流量比尺为871，压强比尺为15，时间比尺为3.873，糙率比尺为1.570 4。

侧槽退水道试验模型主要由分水池、侧堰、侧槽段、平面弯道箱涵段、陡坡箱涵段、消力池、海漫段等组成，模型进出口均安装有量水堰，量水堰依据模型流量范围并参照《水工（常规）模型试验规程》（SL 155—2012）[19]的规定采用矩形薄壁堰，小流量时，为了提高流量的量测精度，在模型下游安装直角三角薄壁量水堰。试验中量水堰均为自由出流，矩形堰流量采用雷伯克经验公式计算，三角堰流量采用南京水利科学研究院标准地秤校正后的拟合经验式计算，详见文献[19]；堰上水头和池水位用测针量测；模型水流点流速用毕托管量测；壁面压强用测压管量测；水流流态用数字摄像机拍摄记录。水工整体模型试验工况见表1。

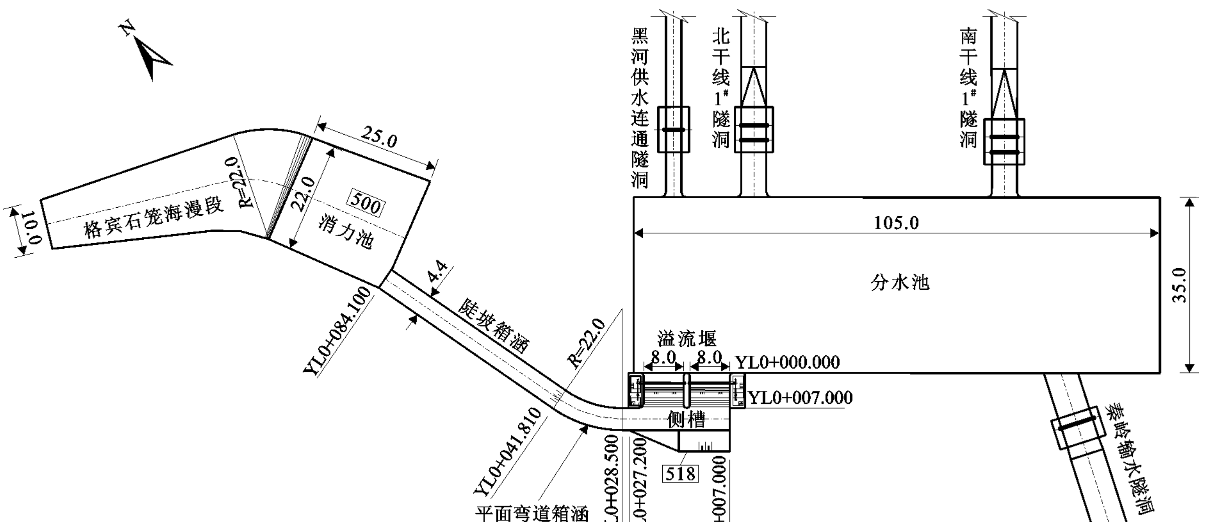


图1 引汉济渭工程黄池沟配水枢纽平面布置图（单位：m）

表 1　水工整体模型试验工况表

| 工况 | 秦岭隧洞来流量/($m^3 \cdot s^{-1}$) | 分水池运行水位/m | 来流量及分水泄量/($m^3 \cdot s^{-1}$) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 南干线 | 北干线 | 黑河供水连通隧洞 | 侧堰溢流 |
| 1 | 70 | 闸顶高程 515.00 m + 堰上水头 | 47 | 0 | 0 | 23 |
| 2 | 70 | | 0 | 23 | 0 | 47 |
| 3 | 70 | 闸顶高程 514.12 m + 堰上水头 | 0 | 0 | 14 | 56 |
| 4 | 70 | | 0 | 0 | 0 | 70 |

注:侧槽退水道试验按钢坝闸直立(工况 1、2)和平放(工况 3、4)两种情形进行,直立闸顶高程 515.00 m,平放闸顶高程 514.12 m。

# 3　结果与分析

## 3.1　过流能力

侧槽退水道池水位 - 流量关系曲线见图 2,由图 2 可见试验点与拟合曲线吻合良好。根据图 2 得出表 2(不同设计池水位的泄流量对比)和表 3(不同设计泄量相应的池水位对比表)。表 2 中堰流流量系数按下列堰流基本公式计算:

$$Q = m'B\sqrt{2g}H^{1.5} \tag{1}$$

式中:$Q$ 为侧槽退水道下泄流量,$m^3/s$; $B$ 为侧堰净宽,m; $m'$ 为考虑了侧收缩和淹没影响的综合流量系数; $H$ 为堰上水头,m; $g$ 为重力加速度,$m/s^2$。

由表 2、3 可知,分水池侧槽退水道侧堰满足设计泄量要求。

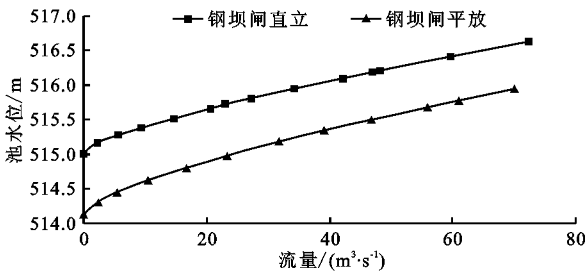


图 2　侧槽退水道池水位 - 流量关系曲线

表 2　侧槽退水道不同设计池水位试验泄量与设计泄量对比

| 设计池水位/m | 设计泄量/($m^3 \cdot s^{-1}$) | 试验泄量/($m^3 \cdot s^{-1}$) | (试验值 - 设计值)/($m^3 \cdot s^{-1}$) | 流量系数 $m'$ | 富余量/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 516.20 | 47.00 | 47.80 | 0.80 | 0.516 | 1.70 |
| 515.95 | 70.00 | 70.93 | 0.93 | 0.405 | 1.33 |

表 3　侧槽退水道不同设计泄量相应的试验池水位与设计池水位对比

| 设计泄量/($m^3 \cdot s^{-1}$) | 设计池水位/m | 试验池水位/m | (设计值 - 试验值)/m |
|---|---|---|---|
| 47 | 516.20 | 516.183 | 0.017 |
| 70 | 515.95 | 515.934 | 0.016 |

## 3.2　水面线

为了验证侧槽退水道边墙设计高度是否满足泄流要求,试验实测了侧槽退水道侧堰(桩号 YL0 + 000.000 ~ YL0 + 004.545 m)、侧槽段(桩号 YL0 + 007.000 ~ YL0 + 028.730 m)、平面弯道箱涵段(桩号 YL0 + 028.730 ~ YL0 + 041.810 m)、陡坡箱涵段(桩号 YL0 + 041.810 ~ YL0 + 084.100 m)、消力池(桩号 YL0 + 084.100 ~ YL0 + 108.100 m)的水面线,图 3 为退水道下泄流量为 70 $m^3/s$ 时沿程实测最高水位与设计边墙顶高程对比。由图 3 可清晰地看到,侧槽退水道沿程实测最高水位均低于设计边墙顶高程,其中实测陡坡箱涵段最大水深断面位于陡坡进口(桩号 YL0 + 041.810 m),为 2.55 m,该段设计边墙高度为 4.6 m,断面净空约为 43.18%,大于 15% ~ 25%,随后水面逐渐降低,净空富余度较大,说明陡坡箱涵边墙高度满足过流要求。

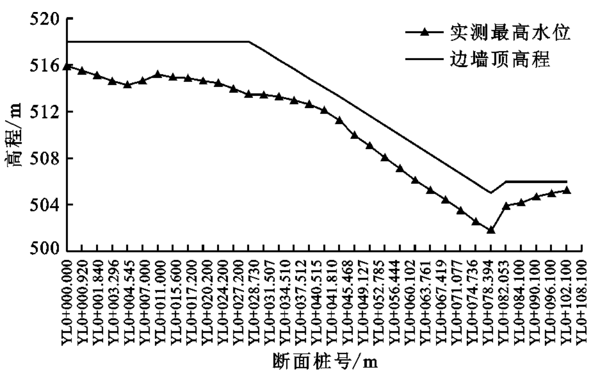


图 3　侧槽退水道沿程实测最高水位与设计边墙顶高程对比

## 3.3　陡坡段水流空化影响

流体力学中,水流空化数 $\sigma$ 常被用来表征泄水

建筑物各位置的空化特性和作为判断空蚀发生与否的指标，$\sigma$ 越小则水流空化的可能性越大。本研究中水流空化数 $\sigma$ 计算采用《溢洪道设计规范》(SL 253—2018)[20]中推荐的公式：

$$\sigma = (h_0 + h_a - h_v)/(v_0^2/2g) \tag{2}$$

式中：$h_0$ 为测压管水头，m；$v_0$ 为计算断面的平均流速，m/s；$h_v$ 为水的压力水头，m，试验中水温约 7 ℃，取 $h_v = 0.102$ m；$h_a$ 为大气压力水头，m，根据计算点高程 $z$ 由公式(3)估算：

$$h_a = 10.33 - z/900 \tag{3}$$

式中：$z$ 为计算点海拔高程，m。

与其他部位相比，退水道陡坡段最易发生空化空蚀[21-23]。试验计算了泄水流量为 56 和 70 m$^3$/s 时陡坡段水流空化数，计算结果见表 4。由表 4 可看出，陡坡段沿程水流空化数逐渐减小；空化数最小值出现在陡坡末端位置，最小值分别为 1.13 和 1.07，大于初生空化数，其余各断面水流空化数均较大。图 4 为泄水流量为 70 m$^3$/s 时退水道陡坡段断面流速分布，图 4 中最大流速在陡坡末端断面，约为 14.55 m/s，小于 15 m/s，因此退水道陡坡段受空蚀破坏的可能性很小。

表 4 退水道陡坡段水流空化数计算表

| 桩号/m | 测点高程/m | 下泄流量/(m$^3$·s$^{-1}$) | |
|---|---|---|---|
| | | 56 | 70 |
| YL0 +041.810 | 509.520 | 4.82 | 4.35 |
| YL0 +060.100 | 505.402 | 1.63 | 1.53 |
| YL0 +084.100 | 500.461 | 1.13 | 1.07 |

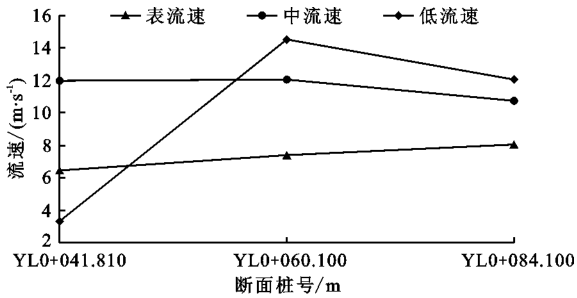


图 4 退水道陡坡段断面流速分布

### 3.4 消力池流态及消能分析

图 5 为消力池在泄量 56 和 70 m$^3$/s 时的水流流态。由图 5 可看出，水流从陡坡箱涵末段流入消力池，在池内形成水跃，跃后水流一部分沿消力池左边墙直接跃过消力坎流向下游海漫；由于消力池为梯形断面，另一部分则在消力池内沿消力池中心形成一个顺时针的回流，而回流促使沿左边墙直接跃过消力坎的水流能量增加，且消力池末端水深较浅，导致消力坎下泄的水流在一定范围内以急流方式向海漫段扩散，并在海漫段内产生折冲水流流向下游。试验测得消力池回流流速沿右边墙中段最大，流量为 56 和 70 m$^3$/s 时，实测最大回流流速分别为 5.34 和 5.42 m/s，回流使消力池流态变差且影响消力池的消能率，消力池周边边壁附近水面较高，消力池中心水面较低，该现象随着流量的增大更加明显。大流量时由于消力池深度不足，而下游消力坎较宽，坎上水深小，导致消力池内产生远驱水跃，同时海漫段水流流态差，局部护岸高度不足。所以设计的消力池在大流量时不满足水跃消能要求。

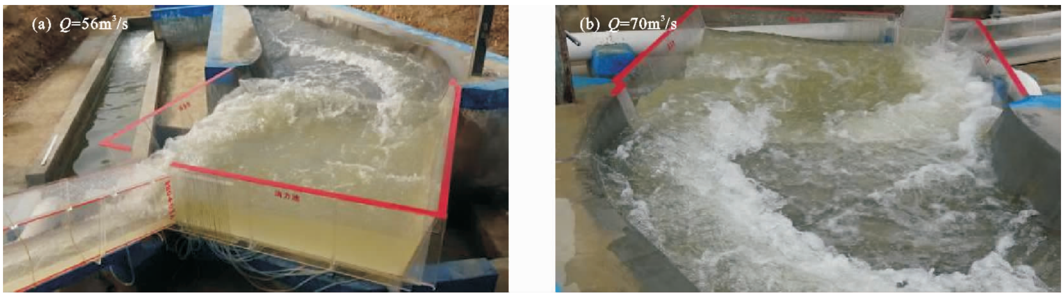


图 5 消力池段水流流态

## 4 结 论

本文通过水工模型试验的方法对黄池沟配水枢纽分水池侧槽退水道的水力特性进行了研究分析，得出如下结论和建议：

(1)设计泄量下试验实测池水位均低于设计池水位，侧堰过流能力满足过流要求；侧槽退水道各段实测最高水位均低于设计边墙顶高程，陡坡箱涵最大水深断面净空约为 43.18%，大于 15% ~25%，随后水面逐渐降低，净空富余度较大。

(2)陡坡段沿程空化数逐渐减小，不同设计流量下最小值分别为 1.13 和 1.07，大于 0.4 ~0.5，说

明退水道陡坡段受空蚀破坏的可能性很小;各工况下的池水位均不高于 516.20 m,而秦岭隧洞顶部高程为 516.76 m,因此秦岭隧洞不会出现明满流交替即闷孔现象。

(3)大流量时由于消力池深度不足,下游消力坎较宽,坎上水深小,导致消力池内产生远驱水跃,不满足水跃消能的要求,建议通过进一步的模型试验来重新设计消力池。

## 参考文献:

[1] 马朋辉, 胡亚瑾, 刘韩生. 台阶式溢洪道滑行流相对水力特性规律研究[J]. 水利学报, 2020, 51(8):997 - 1007.

[2] 孙德旭, 牧振伟, 李凡琦, 等. 弯段溢洪道导流墩联合糙条消能工水力特性试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2):166 - 171.

[3] 王海军, 张 凡, 李会平. 溢洪道泄流临底流速仿真模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5):128 - 132.

[4] 叶祥飞, 宿 生, 周 琦, 等. 竖井式溢洪道进水口体形优化设计与研究[J]. 水力发电, 2019, 45(1):48 - 52.

[5] 靳 晟, 李 琳. 基于数值模拟的某阶梯溢洪道方案优化研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5):17 - 22.

[6] 谭立新, 李梅玲, 唐 敏, 等. 前置掺气坎坡度对阶梯溢洪道掺气水流影响的数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4):150 - 155.

[7] 陈小威. 侧槽溢洪道水力特性模型试验与数值模拟研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017.

[8] 白继中, 孙西欢, 田 淳. 申庄水库溢洪道水力特性试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(S1):101 - 102 + 105.

[9] 唐 涛, 王海军, 佟庆彬, 等. 蒿枝坝水库工程溢洪道侧堰水工模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2005(10):58 - 60.

[10] 赖 勇, 唐 毅, 顾锡春, 等. L形溢流堰侧槽溢洪道水力设计与试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(2):80 - 82.

[11] 杜跃亭, 叶 龙, 宋炳忠. 侧槽式溢洪道水力特性模型试验研究[J]. 水利建设与管理, 2020, 40(3):40 - 44.

[12] 朱翠民 ,皇甫泽华, 皇甫明夏, 等. 基于水工模型试验的前坪水库溢洪道优化设计研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(1):111 - 120.

[13] 刘发智,张法星,王 超,等. 侧槽式溢洪道水流的紊流数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(4):95 - 98.

[14] 杜跃亭, 王志祥. “L”形侧槽式溢洪道水力特性数值模拟及优化研究[J]. 水利建设与管理, 2020, 40(4):27 - 32.

[15] 杨 通. 卓于水库溢洪道水力特性的模型试验与数值模拟研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.

[16] 石胜友, 高华峰, 李 琳. 某水库溢洪道方形消力竖井优化研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3):182 - 188 + 193.

[17] 张文传, 王均星, 董宗师, 等. 竖井旋流式溢洪道消能及空化特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(12):3011 - 3019.

[18] 颜 婷, 刘韩生. 达克曲克水电站溢洪道空化空蚀问题研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(5):77 - 80.

[19] 中华人民共和国水利部. 水工(常规)模型试验规程:SL 155 - 2012 [S]. 北京:水利水电出版社, 2012.

[20] 中华人民共和国水利部. 溢洪道设计规范:SL 253—2018 [S]. 北京:水利水电出版社, 2018.

[21] 张逸军, 尹进步. 深孔泄洪洞工作(闸)弧门下游水流空化特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(2):168 - 173.

[22] 张 林. 水电站溢洪道空化数分布及抗空蚀措施分析[J]. 水利科技与经济, 2016, 22(7):103 - 106.

[23] 王 新, 李 媛. 水工混凝土高速水流空蚀破坏机制试验研究[J]. 水力发电, 2019, 45(10):111 - 115.