阜平抽蓄电站泄水明渠行洪影响数值模拟计算与水工模型试验研究

陈天城，王健楠，康天宇
深能阜平蓄能发电有限公司，河北 保定 073200

摘　　要： 本文针对阜平抽水蓄能电站下水库泄水明渠裁弯取直工程，采用数值模拟与水工模型试验相结合的形式对该整治工程进行了研究，研究内容主要包括河道的水位线变化、流速分布，整治工程明渠的纵坡、糙率变化敏感分析以及河道的冲淤变化分析。数值模拟结果与模型试验结果吻合度较高，有力地验证了本文构建的数学模型的可靠性。研究结果为：整治工程的实施后明渠行洪能力有较大提高；其次，为优化明渠整治段内流速分布、保持开挖过程河势稳定，提出了综合考虑明渠纵坡和糙率的开挖方案（挖槽方案Ⅲ）；最后，针对明渠内河岸局部淘刷问题，开展动床模型冲刷试验，基于试验结果给出了丁坝群的推荐布置方案。

关 键 词： 阜平抽水蓄能电站；河道型水库；拦河坝；泄水明渠；裁弯取直；水面线

Numerical Simulation Calculations and Hydraulic Modeling Tests on the Flooding Impact of the Discharge Nullah of Fuping Pumping and Storage Power Station

Chen Tiancheng, Wang Jiannan, Kang Tianyu
Shenneng Fuping Energy Storage Power Generation Co., Ltd. Fuping County, Baoding , Hebei 073200

Abstract: Abstract : In this paper, for the Fuping pumped storage power station under the reservoir discharge nullah straightening project, using numerical simulation and hydraulic model test form of the combination of the remediation of the project was studied, the study mainly includes the water level changes in the river channel, flow velocity distribution, remediation of the longitudinal slope of the nullah, the change of the roughness of the sensitivity of the analysis as well as the change of the siltation changes in the river channel analysis. The numerical simulation results have a high degree of agreement with the model test results, which strongly verifies the reliability of the mathematical model constructed in this paper. The results of the study are as follows: the flooding capacity of the nullah is greatly improved after the implementation of the remediation project; secondly, in order to optimize the distribution of flow velocity in the remediation section of the nullah and to maintain the stability of the river in the process of excavation, the excavation scheme (trenching scheme Ⅲ) is proposed to comprehensively take into account the longitudinal slopes and the brownness of the nullah; lastly, in view of the problem of local scouring of the river bank in the nullah, the scouring test of the moving bed model is carried out, and the recommended layout of the ding-dong dam group is given on the basis of the test results.

Keywords: Fuping pumped storage power station; riverine reservoirs; barrage; spillway nullah; short cutting; water line

一、概述

近些年来，为加快国家能源结构转型，构建安全稳定的社会电力系统，抽水蓄能电站的发展备受青睐。抽蓄电站的基本工作原理为在用电高峰时发电放水，用电低谷时抽水蓄能，其良好的动态效益能够提高电力系统运转效率、灵活性及可靠性，为构建安全稳定的电力系统提供保障[1-3]。在抽蓄电站的建设过程中，下水库的泄水明渠的行洪影响尤为重要，明渠工程如何在兼顾生态保护的同时，满足高标准洪水行洪安全要求，成为目前抽水蓄能电站河道性水库建设中亟待解决的技术难题。

本文的主要工作为通过数值模拟与水工模型试验相结合的方式论证了阜平抽水蓄能电站下水库泄水明渠天然河道优化布置方案；其次，为优化明渠整治段内流速分布、保持开挖前后河势稳定，提出了综合考虑明渠纵坡和糙率的开挖方案；最后，针对最优布置方案及其防护范围，依据格宾石笼等抗冲流速指标建立动床物理模型，开展河床冲淤变化试验研究，给出合理的上下游河道防护方案。

作者简介：陈天城（1966.12-），男，汉族，福建省福州市，博士研究生，高级工程师，研究方向：水工结构。

二、工程概况及研究方法

（一）工程概况

阜平抽水蓄能电站位于河北省保定市阜平县砂窝乡境内。上水库位于沙河右岸支沟上游的沟脑处，下水库位于阜平县砂窝乡龙王庄村陡岭台自然村，S203省道k156里程桩的沙河河道弯段内。下水库位于沙河上，修筑上下游拦河坝截取河道形成下水库，局部防渗，上、下游拦河坝采用沥青混凝土心墙堆石坝。正常蓄水位为432.00m，死水位408.00m。正常蓄水位以下库容925万 m^3，其中调节库容853万 m^3。图1-1为阜平抽水蓄能电站下水库土石坝布置与天然河道裁弯取直工程示意图。

河道明渠截弯取直陡岭台形成下库，河道明渠平顺连接沙河上下游，为减缓河道明渠过流流速，对河道明渠进口上、下游侧进行河道整治及适当防护，河道明渠整体进口高程为416m、出口底板高程为398m，总长约760m，平均坡度约2.4%，宽90m，两岸开挖坡度采用1:0.75。开挖边坡分别于高程415m、435m、455m处设置3m宽马道。为防止水流对明渠出口下游河道造成冲刷破坏，明渠出口下游河道1.3km范围内设置格宾石笼防护，并在左岸位置布置丁坝。

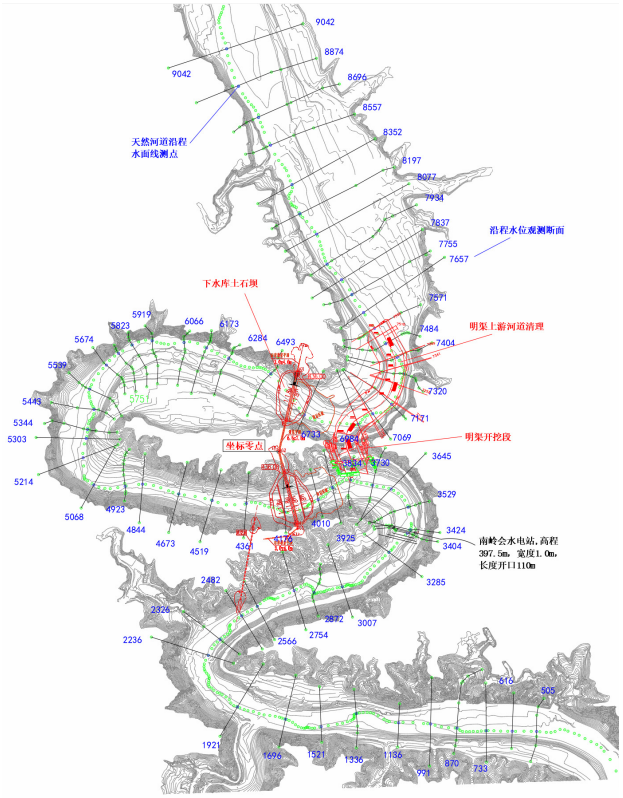


图2-1阜平抽水蓄能电站天然河道裁弯取直工程

（二）计算模型

对天然河道进行建模，采用对于中小尺度复杂水域具有较好适应性的非结构化网格划分，计算域上游设置入流边界，桩号0+9042m，给定入流流量条件，计算域下游为出流边界，桩号0+505m，给定出口水位。河道主槽糙率取0.045；树木植被较多的滩地，糙率取0.1；河中滩地糙率取0.075。图2-2为计算域网格示意图，图2-3为沿程水位监测点分布[4]。

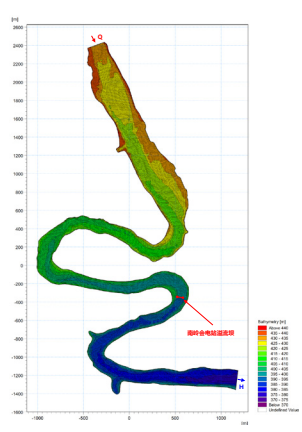


图2-2计算域网格示意图

图2-3沿程水位测点分布

三、原河道与整治工程数值模拟结果对比分析

整治工程实施后，上游河道整治段，水面线较之天然状态显著降低，明渠进口流速较之天然情况增大。明渠出口下游河道水面线则与天然情况一致，出口流速量级与天然情况相同，两者水面衔接良好。南岭会溢流坝位于明渠下游0+3414m桩号，自明渠出口至南岭会电站河段，水位、流速与天然情况趋于一致，未受到明渠出口流态的影响。南岭会电站溢流坝下游河段水位~流量关系不受整治工程影响。

四、物理模型试验结果分析

（一）物理模型的设计

为进一步验证整治方案的可行性，本节针对明渠整治工程设计方案，开展物理模型试验，模型具体布置参见图4-1。模拟范围包括整治段上游0+7787m断面~泄洪洞出口下游0+2236m断面。根据模型糙率比尺，整治段对应模型糙率0.0216；模型河道底面制作采用水泥砂浆抹面，采用正方形梅花加糙后糙率达到0.0201~0.0220，满足与原型相似；明渠出口下游，南岭会电站溢流坝采用有机玻璃制作，模型糙率为0.008。明渠整治段模型散粒体粒径在0.4~1.4mm，中值粒径1.0mm。明渠开挖段模型散粒体粒径9~15mm，中值粒径12mm。

模型比尺为1：80。模型按重力相似准则设计，并且满足几何相似、运动相似与阻力相似。试验工况选取同上文数值模拟工况。图4-2为明渠整治工程模型上游视图，图4-3为明渠开挖段模型下游南岭会溢流坝示意图[5]。

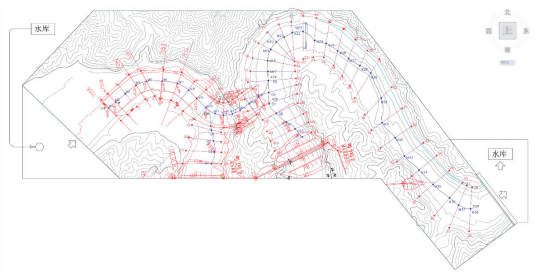


图4-1 明渠整治工程设计方案物理模型试验布置

图4-2明渠整治工程模型上游视图

图4-3 明渠开挖段下游南岭会溢流坝

（二）模型试验结果与数值模拟结果对比验证

图4-4、4-5为典型洪水条件下，整治河段水位与流速沿程分布试验点据。为便于比较，图中列出了对应测点的数学模型计算结果。对比分析表明：不同频率洪水条件下，河道沿程水位与流速分布规律的模型试验与数值计算值相吻合，证明了前述数学模型分析方法的可靠性。

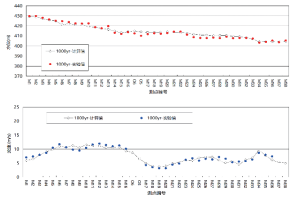


图4-4 1000年洪水河道水位与流速沿程分布

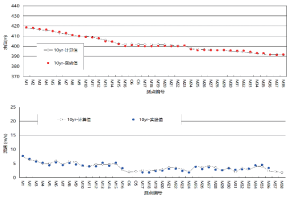
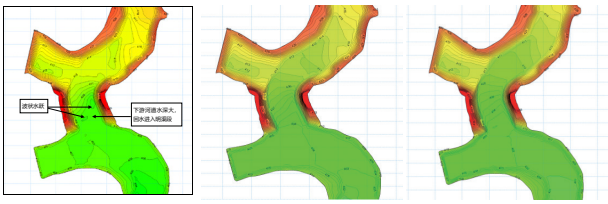


图4-5 10年洪水河道水位与流速沿程分布

（三）明渠开挖段流态分析

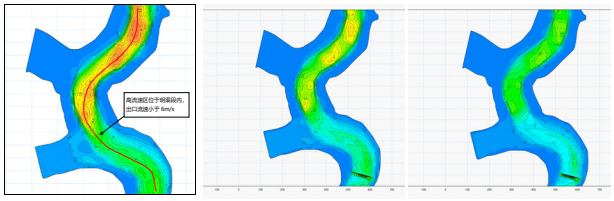
综合前述数学模型分析结果与物理模型试验数据，得到不同频率洪水条件下明渠开挖段在天然状态与整治工程实施后的流速指标。指标表明，各种频率洪水条件下，明渠工程进口流速，高于天然河道流速，相对而言，出口流速较之天然河道变化较小。在上游10年一遇以下洪水时，明渠出口流速与天然状态下河道流速量值基本一致。各种频率洪水条件下，明渠进口流速较高，出口流速则降低，究其原因，与明渠内主流摆动、下游回水影响及流速测点位置选取等因素有关。

图4-6与图4-7分别为50年、20年、10年一遇洪水，明渠开挖段内水位与流速分布规律。分析表明：开挖明渠前半段内，水流顶冲右岸，该区域内水面陡降，流速相对较高，明渠后半段，水面坡降与流速迅速减小。明渠出口~南岭会河段，河道坡降小，水面平缓，在50年一遇洪水时，河道水深较大，回水进入明渠段中部，两者衔接处水面发生波状水跃。在10年一遇洪水条件下，明渠段沿程流速下降至2~4m，明渠出口水流与下游河道平顺衔接，水面波状水跃消失[6]。



(a) 50年洪水　(b) 20年洪水　(c) 10年洪水

图4-7 50年~10年一遇洪水明渠水面线分布



(a) 50年洪水　(b) 20年洪水　(c) 10年洪水

图4-8 50年~10年一遇洪水明渠流速分布

综上所述，由于南岭会溢流坝产生壅水作用，使得明渠整治方案消能区位于基岩开挖段内，出口水流与下游河道衔接良好，流速量级逐渐恢复天然状态。

（四）整治工程设计方案行洪问题分析

综合前述数学模型分析结果与物理模型试验数据，可知裁弯取直工程实施后，上下游水流衔接较为平顺。在10年一遇洪水标准下，明渠上游河道整治段流速5~6m/s，明渠开挖段3~5m/s，下游河道天然流速3~4m/s，明渠出口~南岭会河段水位、流速与天然河道甚为一致，证明了整治工程设计方案切实可行。

此外，明渠上游整治段，水流沿程加速，至明渠开挖段内局部流速仍较高，而出口下游南岭会河段水面线坡降平缓，流速则相对较小。因此建议在明渠整治段、开挖段内采取格宾石笼抗冲保护[7]。

五、整治工程设计方案纵坡与糙率影响敏感分析

本节建立河道数学模型，采用数值模拟方法，针对整治工程设计方案(挖槽方案I)，进行纵坡调整(挖槽方案II)与糙率变化(挖槽方案III)影响的敏感分析。

（一）整治工程明渠纵坡变化敏感分析

为了降低明渠整治段内流速，拟针对明渠纵坡进行微调，经计算表明：在10年一遇洪水条件下，明渠上游整治段内主流流速4~6m/s，在明渠开挖段下游桥墩附近流速较大，量值6~7m/s，但小于格宾石笼抗冲流速。在20年一遇洪水条件下，明渠上游整治段主流流速6~7m/s，左岸凸体附近流速超过8m/s，下游开挖段桥墩附近流速增大，量值8~9m/s，超过格宾石笼抗冲流速。在50年一遇洪水条件下，明渠沿程流速超过9~10m/s，下游开挖段桥墩附近流速量值10~11m/s。在100年一遇洪水条件下，明渠沿程流速10~11m/s，下游开挖段桥墩附近流速量值11~12m/s。

（二）明渠糙率变化敏感分析

明渠开挖后，为保持河势稳定，沿程拟采用格宾石笼防护，抗冲流速指标7-8m/s，但沿程糙率较之挖槽方案I与II中糙率明显减小。因此在挖槽方案II的基础上，将明渠沿程糙率调整为0.025，形成挖槽方案III。表5-1为明渠挖槽方案I与方案III，开挖段内流速指标变化情况。挖槽方案III中流速较之挖槽方案I显著增大。分析表明：

明渠整治段位于砂砾石覆盖层上，抗冲流速仅为1~2m/s，因此采用格宾石笼防护是必要的，河床抗冲流速可提高到7~8m/s。明渠挖槽方案，河段采用格宾石笼防护，抗冲流速提高，但糙率下降，流速较之明渠挖槽方案I明显增大，调整明渠底坡亦无法抵消其影响。明渠挖槽方案III，整治段底坡变缓，开挖段起坡点上移，出口流速增大，与下游河道水流衔接位置下移，对下游河道防护不利。

表5-1 明渠开挖段流速指标

洪水频率频率	泄洪流量 (m^3/s)	进口流速 (M12)		出口流速 (M16)	
		方案 I	方案 III	方案 I	方案 III
100yr	5470	8.9	12.6	6.7	9.3
50yr	3860	7.8	11.8	5.7	9.1
30yr	2800	6.9	11.1	4.7	8.7
20yr	2040	6.2	10.6	4.0	8.0
10yr	996	4.7	8.6	2.8	7.0
5yr	364	3.2	6.7	2.0	4.4
2yr	163	2.2	4.9	1.6	2.9

六、整治工程方案河道冲淤变化分析

本节针对明渠开挖布置方案，依据格宾石笼抗冲流速指标，开展了动床冲刷试验研究，模型比尺1:80。基于试验研究结果，提出了20年一遇洪水标准与100年一遇洪水标准下，明渠整治工程丁坝布置方式与格宾石笼防护范围。图6-1和图6-2分别为20年、100年洪水的丁坝布局及格宾石笼防护范围。丁坝坝头基础深度建议按照100年一遇洪水标准冲刷高程，下挖2~3m，坝顶高出当地高程3~4m，可保证行洪过程中坝体稳定安全。格宾石笼的防护范围，应当涵盖明渠全长。

图6-1 20年洪水丁坝及格宾石笼防护范围

图6-2 100年洪水丁坝及格宾石笼防护范围

七、结语

本文通过数学模型与物理模型相结合的方法，针对阜平抽蓄电站下水库裁弯取直整治工程设计方案进行研究。主要内容与结论如下：

1.通过构建数学模型对比分析了整治工程实施前后的水位、流速变化，结果表明整治工程方案实施后，明渠内水流沿程加速，水位较之天然状态显著下降，行洪能力增大。

2.对整治方程开展了物理模型试验，试验与计算结果吻合度较高，验证了本文构建的数学模型的可靠性。

3.基于物理模型试验结果对整治工程开挖段的流态进行了分析，针对明渠整治工程（挖槽方案Ⅰ）的部分行洪问题，进行了纵坡调整（挖槽方案Ⅱ）与糙率变化（挖槽方案Ⅲ）的敏感分析，当挖槽方案整治段坡度变缓后，由于上下游水位差不变，而开挖段坡度较陡，明渠水流沿程加速，如无防护措施，自下而上将发生溯源冲刷，使得整治段底坡逐渐变陡。此外，当挖槽方案采用格宾石笼防护后，糙率较之天然情况有所降低，沿程流速显著增加，其影响无法通过减小整治段比降加以抵消，因此，需要通过动床模型试验确定整治方案底部高程与沿程坡降。

4.为进一步明确明渠设计底坡，在挖槽设计方案基础上，基于格宾石笼防护条件，开展动床模型冲刷试验，针对明渠内河岸局部淘刷问题，给出了丁坝群的推荐布置方案，对于明渠上下游流态调整与冲淤变化具有全局影响。

参考文献

[1] KONG Y, KONG Z, LIU Z, et al. Pumped storage power stations in China: The past, the present, and the future [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 71: 720-731.

[2] REHMAN S, Al-HADHRAMI L M, ALAM M M. Pumped hydro energy storage system: A technological review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 586-598.

[3] 邱彬如，刘连希. 抽水蓄能电站工程技术 [M]. 北京：中国电力出版社，2008.

[4] 冷超勤，周俊毅，罗永钦，等. 某水电站泄洪明渠水力学原型观测与分析 [J]. 云南水力发电，2022, 38(02): 37-40.

[5] 李乃稳，何孟，刘超，等. 陡坡粗糙矩形明渠中自由跌流的水力特性 [J]. 工程科学与技术，2019, 51(06): 83-89.

[6] 戚蓝，徐彭强，杨波. 基于原始河道分流比下的导流明渠的设计论证 [J]. 水力发电，2019, 45(11): 67-73+100.

[7] 孙东坡，王书会，李全家，等. 某水库泄洪明渠末端扩散段急流控导试验研究 [J]. 水利水电技术，2015, 46(04): 134-138.