

水利水电工程导流明渠施工中的水流稳定性研究

刘应涛

四川尚金建设项目管理有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i2.6124

[摘要] 导流明渠作为水利水电工程施工过程中的关键临时建筑物,其稳定性直接关系到工程安全与进度。本文以碾盘山水利水电枢纽工程导流明渠为例进行研究,分析了明渠水力特性与防护要求,探讨了混凝土铰链排等柔性防护措施的应用效果。基于水流数学模型与实测数据,确定了导流明渠关键区段的冲刷深度与稳定性参数。研究表明,明渠通水后产生的河床冲刷与洪水条件密切相关,在高强度洪水条件下,铰链排防护能有效适应地形变化,保持边坡稳定。该研究为类似工程提供了防护设计参考,优化了防护材料选择与施工技术,对提高导流明渠施工期安全具有重要意义。

[关键词] 导流明渠; 水流稳定性; 铰链排防护; 冲刷深度; 水利水电工程

中图分类号: TV131.3 文献标识码: A

Study on water flow stability in diversion channel construction of water conservancy and hydropower projects

Yingtao Liu

Sichuan Shangjin Construction Project Management Co., LTD.

[Abstract] As a key temporary structure in the construction of water conservancy and hydropower projects, the stability of open channel is directly related to the safety and progress of the project. This paper analyzes the hydraulic characteristics and protection requirements of open channel, and discusses the application effect of flexible protection measures such as concrete hinge row through the example of Lanpanshan water conservancy and hydropower project. Based on the flow mathematical model and measured data, the erosion depth and stability parameters of the key section of the diversion channel are determined. The results show that the channel erosion is closely related to the flood condition. Under the condition of high intensity flood, the hinge row protection can effectively adapt to the terrain change and keep the slope stable. This study provides a reference for similar engineering protection design, optimizes the selection of protective materials and construction technology, and has important significance for improving the safety of diversion open channel during construction.

[Key words] diversion channel; Water flow stability; Hinge row protection; Scour depth; Water conservancy and hydropower engineering

导流明渠是水利水电工程施工中不可或缺的临时建筑物,承担着河道导流与施工区域排水的重要功能。在复杂水文条件下,明渠水流特性呈现高度非线性,易在河床底部及边坡形成强烈的冲刷作用。特别是在高流量与高流速条件下,明渠通道的稳定性面临严峻挑战,一旦防护措施失效,不仅会造成工程延误,更可能引发严重的安全事故。针对导流明渠的稳定性问题,有必要从水力学特性与防护技术及工程实践三个维度进行系统研究,建立科学合理的评估体系与防护标准,为相关工程实践提供技术支撑与决策参考。

1 工程概况

1.1 导流明渠基本情况。碾盘山水利水电枢纽工程位于汉江

中游河段,上距雅口航运枢纽58km,下距兴隆水利枢纽63.5km。工程于2018年8月开工建设,2019年3月实现大江截流与导流明渠正式通水。导流明渠采用围堰一次拦断河床与左岸开挖过流的方式进行施工导流,如图1所示。明渠全长2.3km,河床底宽250m,两岸开挖边坡坡比为1:3,呈梯形断面。河床进口高程为39.0m,出口高程为38.0m,纵坡较缓,保证水流平稳过渡。明渠左岸与汉江左岸副坝衔接,为工程防护的重点区域。导流明渠布置充分考虑了河道走向与地形条件与水流特性,避免了急转弯与不利水流条件^[1]。明渠通过的最大实测洪峰流量达11800m³/s,达到设计标准的87%,验证了导流设计的合理性。

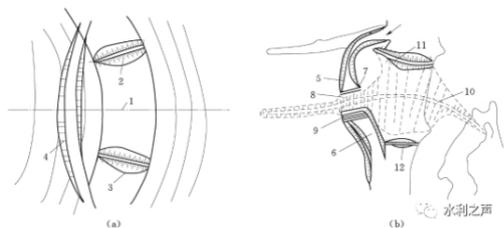


图1 明渠导流示意图

(a)在岸坡上开挖的明渠; (b)利用水电站引水渠与尾水渠的导流明渠1—水工建筑物轴线; 2—上游围堰; 3—下游围堰; 4—导流明渠; 5—电站引水渠; 6—电站尾水渠; 7—电站进水口; 8—电站引水隧洞; 9—电站厂房; 10—大坝坝体; 11—上游围堰; 12—下游围堰

1.2地质与水文条件。导流明渠所在原河滩地质条件复杂多变,垂直方向呈现明显的分层特征。地面至30m高程主要为有机质壤土及粉细砂层,中间粒径 d_{50} 为0.078mm,不冲流速仅为1m/s以下,极易受水流冲刷。30~20m高程区间为砂砾石层,粒径大于5mm的砾石含量为43.4%~97.8%,不冲流速约为2m/s,抗冲性能较好。20m高程以下则为较坚硬的砂岩基岩层。导流明渠基础及边坡多数开挖于粉细砂层,抗冲刷能力差,导致明渠河床在通水后冲淤变化显著^[2]。碾盘山工程所在汉江河段水文特性显著,年内流量变化大,汛期最大流量可达枯水期的10倍以上。

1.3导流标准与设计的要求。碾盘山水利水电枢纽工程导流明渠的设计标准为10年一遇,对应导流设计流量为13500m³/s。根据导流模型试验预测,当水流量分别为3000与9000与13500m³/s时,导流明渠内最大流速将达到2.85与3.89与4.76m/s,远超明渠河床粉细砂层的不冲流速,必然导致河床下切形成冲坑。导流明渠左岸为凹岸,右岸为凸岸,水流会向左岸集中,使左侧冲刷更为严重。在明渠进口段,水流流态复杂,局部地区出现旋涡与回流等不稳定现象。考虑到明渠左岸与汉江左岸副坝直接衔接,设计特别强调左侧边坡防护的重要性,一旦边坡受损,出现大面积垮塌,将直接危及左岸副坝安全^[3]。因此,导流明渠防护设计中,左岸0~900~0+150段边坡坡脚采用铰链排防护,边坡及马道采用钢筋石笼护砌,渠底河床自坡脚处起向河床中间一段范围内设置混凝土铰链排护底,护底端部设置防冲槽,铰链排下设土工布。

2 混凝土铰链排防护技术应用

2.1防护方案选择依据。碾盘山水利水电枢纽导流明渠防护方案的选择基于工程特性与现场条件的综合考量。选择混凝土铰链排作为防护措施主要考虑了该技术在强水流冲击条件下的优异表现。铰链排是由预制混凝土块以及钢绞线或U型环串联而成的一种新型岸坡防护结构,具有抗冲刷能力强、整体性好与耐久性强等优点。针对导流明渠左岸0~900~0+150段边坡坡脚的防护,铰链排尤为适用,因为该区域临近左岸副坝,安全要求高;此处为凹岸,水流冲击强烈;同时地质条件为粉细砂层,不冲流速低于1m/s,在设计流量下极易形成严重冲刷^[4]。铰链排的柔性防护特点能够适应岸坡冲刷变形与河床变形,在河床出现大范

围冲刷时不影响边坡稳定。

2.2铰链排结构与参数。碾盘山导流明渠铰链排防护的结构设计以河床冲刷深度预测为基础,通过多种方法对比确定设计参数。根据GB50286-2013《堤防工程设计规范》采用张瑞瑾公式计算冲刷深度:

$$h_0 = h_0 \left[\left(\frac{u_{cp}}{u_c} \right)^n - 1 \right]$$

式中: h_s 为冲刷深度(m); h_0 为行进水流的水深(m); u_c 为泥沙起动流速(m/s); u_{cp} 为近岸垂线平均流速(m/s); n 与防护岸坡在平面上的形状有关。

为增强可靠性,还采用岗恰洛夫公式与唐存本公式与沙玉清公式进行交叉验证,并结合动床试验得出左岸0~915.00~0+150.00段河床最大冲刷深度为9.32m。铰链排宽度采用JTJ239-2005《水运工程土工合成材料应用技术规范》计算:

$$L \geq k_p \Delta h_p \sqrt{1+m^2}$$

计算得出 $L \geq 17.13$ m,取铰链排铺设宽度为20m;通过临界流速计算确定铰链排厚度为0.4m。铰链排预制混凝土块设计尺寸为95cm×45cm×40cm。铰链排末端设置截面积为15m²的抛石防冲槽以保证稳定性,并在下部铺设土工布,起反滤作用,减少下部泥沙流失。在明渠左岸副坝段,铰链排布置形成完整的防护系统,如图2所示,包括边坡钢筋石笼护砌与坡脚铰链排防护与河床铰链排护底与防冲槽等组成部分,形成综合防护体系。

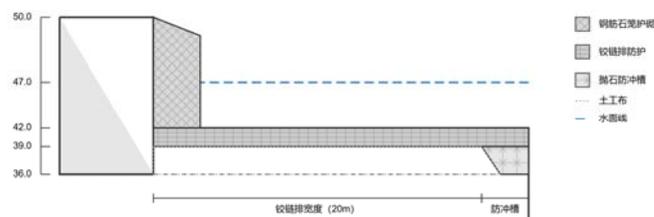


图2 明渠左岸副坝段防护典型断面

2.3施工技术与质量控制。碾盘山导流明渠铰链排防护施工采取“单块预制与单块运输”方案。预制混凝土块在浇筑前预埋PVC管作为钢绞线穿孔。实际施工中,混凝土块质量控制关键点为强度管理,混凝土块强度达到设计强度50%时方可拆模,达到75%时进行运输与吊装。现场安装时,先将混凝土块精确定位,然后通过预留孔穿入 $\phi 15.2$ mm镀锌钢绞线将单块混凝土串联成整体铰链排,钢绞线端部采用专用夹具固定,确保不会松动。施工记录显示,铰链排下部土工布铺设时,保持了30cm以上的搭接宽度,土工布边缘采用砂土压边防止移位。抛石防冲槽施工采用定点抛石法,控制石料粒径在30~50cm之间^[5]。碾盘山工程实际施工过程中,铰链排单日最大铺设长度达120m,最终验收检测表明90%以上的施工段铰链排铺设高程误差控制在 ± 3 cm内,平面位置误差控制在 ± 10 cm内,满足设计要求。

3 防护效果评估分析

3.1 冲刷深度监测与分析。碾盘山水利水电枢纽导流明渠自2019年通水以来经历了三个汛期,对其关键断面进行了定期监测。桩号0+000断面位于明渠中段,渠宽最窄,水流流态较差,冲刷最为严重,具有代表性。如表1所示,2019年3月导流明渠通水初期,流量为670m³/s,冲坑深度为4.5m;2019年9月遭遇7400m³/s洪峰,冲坑深度增至6.6m;2020年最大洪峰为4800m³/s,冲坑深度略增至7.6m;2021年9月汛期最大洪峰达11800m³/s,冲坑深度迅速增至11.6m,深入砂砾石层。数据分析表明,冲刷深度与洪峰流量呈明显正相关关系,洪峰越大,冲坑深度越深。实测最大冲刷深度超过了设计预测值,与明渠水下地层条件有关。监测显示冲坑呈“V”字型向纵深发展,边坡坡度从初始的1:2.5逐渐变陡至1:1.5,非汛期无明显回淤现象。

表1 导流明渠水文数据及冲坑深度统计表

时间/(年-月)	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	坝址水位/m	平均流速/(m·s ⁻¹)	冲坑深度/m
Mar-19	670	39.57	0.67	4.5
Sep-19	7400	45.5	2.49	6.6
Aug-20	4800	44.1	1.95	7.6
Sep-21	11800	47.78	2.85	11.6

3.2 铰链排防护效果分析。根据表2所示的冲刷深度计算结果,张瑞瑾公式与岗恰洛夫公式与唐存本公式与沙玉清公式计算值分别为8.81m与7.95m与8.92m与9.28m,均接近动床试验结果9.32m。实际监测显示,最大冲坑深度达11.6m,超过设计预期。然而,铰链排表现出优异的适应性:当冲坑扩展至防护边缘时,铰链排随地形变化下垂,紧贴冲刷后的边坡,阻止了冲坑向岸侧扩大。现场观测表明,铰链排最大下垂距离达4.8m,仍保持结构完整。水下检测显示,土工布始终紧贴地面,没有悬空或翻卷现象,有效防止了细颗粒流失。铰链排末端块石压重在冲坑形成时滑落,起到固脚作用。相比之下,同期检测的钢筋石笼防护区域出现结构损坏,显示铰链排在强水流条件下的优势。

表2 冲刷深度计算结果统计表

计算方法	起动流速 u_c /(m·s ⁻¹)	冲刷深度 h_s /m
张瑞瑾公式	0.5836	8.81
岗恰洛夫公式	0.5308	7.95
唐存本公式	0.4265	8.92
沙玉清公式	0.3946	9.28
模型试验结果	-	9.32

4 水流稳定性影响因素研究

4.1 水文条件对明渠稳定性的影响。碾盘山水利水电枢纽导流明渠在不同流量条件下的稳定性表现各异。水文监测数据显示,明渠通水后的冲刷过程与流量大小呈现明显相关性。在670m³/s的低流量下,冲刷仅限于河床中线附近的粉细砂层;当流量

增至7400m³/s时,冲坑范围迅速向两岸扩大,深度增至6.6m;而在11800m³/s的高流量条件下,冲坑深度达11.6m,已深入砂砾石层。这表明洪峰流量对冲刷深度的影响具有阈值特性:低于3000m³/s时冲刷较为缓慢,流量超过7000m³/s后冲刷加剧。同时,洪水持续时间也是影响因素之一,2021年持续一个月的高水位期间,冲刷深度增加了4m,比短时洪水冲刷效应更为显著。

4.2 地质条件与水流稳定性关系。碾盘山导流明渠沿线地质条件复杂,直接影响水流与河床的相互作用。通过对冲坑形态演变的观测分析,发现地质分层对冲刷过程产生显著影响。明渠开挖至地面以下30m高程的地层主要为粉细砂与砂壤土,不冲流速低于1m/s,在2.85~4.76m/s的设计流速下极易被冲刷。实际冲刷监测表明,在该地层,水流冲刷速率可达每小时30~50cm。当冲坑深度达到30~20m高程的砂砾石层后,冲刷速率骤减至每小时3~5cm,体现了不同地层抗冲性能的巨大差异。冲坑深入砂砾石层后,冲坑横向扩展趋势加强,对边坡稳定构成威胁。这种地质条件下,传统刚性防护结构难以适应冲坑形态变化,而铰链排防护能够随冲坑形态调整,维持防护效果。

5 结语

水利水电工程导流明渠施工中的水流稳定性研究表明,混凝土铰链排作为一种柔性防护技术,在复杂水流条件下表现出优异的适应性与防护效果。通过对碾盘山水利水电枢纽工程导流明渠的系统观测与分析,揭示了冲刷深度与流速分布与防护结构相互作用的内在规律。研究成果对于指导类似工程具有重要参考价值:铰链排的柔性防护特性能够有效适应地形冲刷变化,保持边坡稳定;土工布反滤层与块石压重的组合应用能够控制渗流与管涌风险;防护结构的整体性设计对于抵抗高流速冲击至关重要。未来研究应进一步优化防护工程设计,完善施工技术,提高工程经济性与环保性,为水利水电工程的安全高效建设提供更加可靠的技术支撑。

参考文献

- [1]陈红兵.基于混凝土铰链排的水利枢纽工程导流明渠防护效果研究[J].云南水力发电,2024,40(04):114-117.
- [2]刘磊,郝中州,邵云强,等.碾盘山水利水电枢纽工程导流明渠混凝土铰链排防护效果分析[J].水利水电快报,2023,44(8):60-64.
- [3]卢少为,罗岚.湖北碾盘山水利水电枢纽导流明渠和泄水闸联合过流模拟研究[J].中国防汛抗旱,2023,33(05):75-79.
- [4]左武宜.浅谈水利水电工程施工导流及围堰技术[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(05)[2024-05-16].
- [5]黄维,涂承义,朱博,等.某水电站导流明渠底板加固设计研究[J].人民黄河,2020,42(S1):95-96+99.

作者简介:

刘应涛(1986--),男,汉族,四川广汉市人,本科,水利水电工程师,研究方向:水利水电施工。