

深厚覆盖层河床截流问题探讨

——以乌东德水电站截流模型试验研究为例

王智娟¹, 周 赤¹, 宛良朋², 姜伯乐¹, 魏红艳¹

(1. 长江科学院 水力学研究所, 湖北 武汉 430010;

2. 中国三峡建设管理有限公司, 湖北 宜昌 443100)

摘 要: 在抗冲能力较差的深厚覆盖层的河床截流时, 底部覆盖层的冲刷可能加大戽堤失稳风险。以乌东德水电站截流模型试验研究为基础, 概括总结了深厚覆盖层河床截流试验研究时需关注的几个关键问题: 首先, 龙口的确定及裹头防护需考虑覆盖层稳定; 其次, 截流困难段与危险区域的判断受覆盖层因素影响; 第三, 戽堤进占量计算需考虑覆盖层流失, 并提供了计算方法。通过三个问题探讨, 增加模型试验研究数据可靠性, 为深厚覆盖层条件下的截流试验和施工提供一定的借鉴。

关键词: 截流; 深厚覆盖层; 冲刷; 戽堤稳定

中图分类号: TV855

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)05-0063-05

Discussion on River Closure in Deep Covering

——Taking the Closure Model Test of Wudongde Hydropower Station as an Example

WANG Zhijuan¹, ZHOU Chi¹, YUAN liangpeng², JIANG Bole¹, WEI Hongyan¹

(1. Institute of Hydraulics, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China;

2. China Three Gorges Construction Management Co., Ltd., Yichang, Hubei 443100, China)

Abstract: When dealing with Riverbed which was intercepted by deep overburden with poor anti scour ability, the scour of the bottom overburden may increase the risk of berm instability. Based on the experimental study on the closure model of Wudongde Hydropower Station, several key problems in the experimental study of river bed closure with deep overburden are summarized. Firstly, the stability of overburden should be considered in the determination of closure and head wrapping protection. Secondly, the judgment of difficult closure section and dangerous area is affected by overburden factors. Thirdly, overburden loss should be considered in the calculation of berm advance. The calculation method is provided. Through the discussion of three problems, the reliability of model test data is increased, which provides a certain reference for closure test and construction under the condition of deep overburden.

Keywords: interception; deep buried layer; scour; berm instability

1 概 述

截流是水电站修建过程中的重要环节, 在导流建筑物具备分流能力条件下, 采用一定的方法拦断原河床形成围堰, 在其保护下进行大坝建设。目前最常用的方法是立堵截流, 通过戽堤进占逐步束窄

河床, 可双向或单向进占。戽堤进占过程中, 水下流态紊乱且不断发生变化, 抛投材料松散等不确定因素较多, 特别是对于一些流量大、终落差高的河道截流时, 具有较高的风险^[1-5]。截流过程中戽堤是否稳定是关系到施工人员与机械设备安全的重要问题。近些年来, 随着科技的进步, 交通和设备大幅改

收稿日期: 2021-07-18

修稿日期: 2021-08-09

基金项目: 中国三峡建设管理有限公司科研项目“乌东德水电站防渗墙施工平台过流和围堰挡水期导流水力学原型监测和模型试验对比分析科研项目”(WDD/0485)

作者简介: 王智娟 (1979—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工水力学、鱼道水力学、通航水力学方面的研究工作。

E-mail: 10587394@qq.com

善、设计和施工人员经验更加丰富、科研人员对各类抛投材料认识及研发更加充分,以及水库梯级调度流量调节等,都大大的提高了截流安全性^[6-7]。

而对于在具有深厚覆盖层无法清除且抗冲能力较差的河床进行截流时,问题会相对较为复杂。国家十一五科技支撑项目课题“深厚覆盖层条件导截流及围堰安全控制技术”对深厚覆盖层河床截流进行了较为全面的研究,项目通过分析不同类型覆盖层的特点以及导截流存在的问题,通过理论分析和模型试验,对深厚覆盖层条件下工程存在的覆盖层稳定性、覆盖层防护、截流块体稳定计算以及淤积性覆盖层河床预防钱堤坍塌措施等关键技术问题进行了全面研究^[2]。近些年来国内外学者也对此进行了大量的研究。以往研究和实践表明:在深厚覆盖层河床中实施截流,当截流流量、落差、龙口流速均较大时,如保护措施不当,会因覆盖层抗冲能力小,在截流过程中形成冲刷性破坏、渗漏管涌性破坏,有时还会造成护底体系的自身稳定破坏和钱堤多种形式的坍塌等,危及截流工程安全^[8-10]。为了避免钱堤失稳风险,在施工过程中首先在选择龙口位置时需尽量避开河床 V 形深槽,对龙口进行护底,采用抗冲能力较强的材料(如钢筋铅丝笼等),足量抛投等^[11-12]。

2 深厚覆盖层河床截流几个关键问题

借鉴以往研究成果,长江科学院水力学研究所开展了乌东德水电站截流一系列的模型试验研究。乌东德水电站工程具有截流流量大、落差大、龙口流速高、河床覆盖层深厚(最厚处约 70 m)等特点,截流难度较高。为了确保工程截流施工的安全性及经济性,确定截流龙口位置及宽度,选择合理进占方式、抛投材料、抛投强度,确定截流(闭气后)终落差等,通过 1:100 水工整体模型进行了相关试验研究。模型试验根据抗冲流速相似选取模型沙,对河床覆盖层进行了模拟,形成动床模型试验,其与常见定床条件下的截流关注因素有所增加,试验研究过程中也得到了一些新的研究成果。

2.1 龙口的确定及裹头防护需考虑覆盖层稳定

在河床条件较好的河段进行截流时,预留龙口宽度一般可由龙口段面平均流速和落差确定。龙口大小需要在合适的范围内,一般来讲,预留龙口过大,龙口段进占工程量大,增加了施工强度,不经济;而龙口过窄会导致龙口部位水力指标过高,造成钱堤破坏甚至坍塌,不安全。而对于在深厚覆盖层的

河床上截流时,龙口宽度的确定还需考虑龙口部位河床及钱堤下游冲刷引起的钱堤失稳风险^[13]。预进占过程中,随着过流断面不断缩窄,底部覆盖层稳定性会逐渐变差,达到或超过抗冲流速后,底部冲刷会引起钱堤坡脚失稳,坡面下滑,甚至引起钱堤局部坍塌,造成安全风险。因此,在深厚覆盖层河床截流时,需要事先通过对龙口落差、流速及不同宽度下覆盖层冲刷深度、范围等进行计算和试验研究,方可确定合适的龙口宽度^[14-15]。

通过计算不同束窄宽度时的泄流能力,可以得出平均流速、单宽流量等水力学指标,进而可以计算出抛投材料粒径。龙口段口门为梯形或三角形断面的宽顶堰,泄流能力按下式计算^[7]:

$$\text{非淹没流: } Q = mb_{cp}(2g)^{\frac{1}{2}}H_0^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

$$\text{淹没流: } Q = \sigma_n mb_{cp}(2g)^{\frac{1}{2}}H_0^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

式中: b_{cp} 为口门平均水面宽度; H_0 为计及行进流速的上游水深; σ_n 为淹没系数,龙口口门为梯形过水断面时,可查巴甫洛夫淹没系数表;龙口口门为三角形断面时,查别列津斯基淹没系数表; m 为流量系数。

其它水力学指标计算如下:

$$\text{龙口平均单宽流量: } q = Q/b_{cp} \quad (3)$$

$$\text{龙口平均流速: } V = q/h_p \quad (4)$$

$$\text{龙口落差: } Z = H_{上} - H_{下} \quad (5)$$

对于深厚覆盖层河床需计算河床冲刷深度,一般局部冲刷深度可按下式初步计算:

$$H_B = H_p + H_p \left[\left(\frac{\bar{V}}{V_{允}} \right)^n - 1 \right] \quad (6)$$

式中: H_B 为局部冲刷深度, m; H_p 为冲刷处的深度, m; \bar{V} 为平均流速, m/s; $V_{允}$ 为河床面上允许补充流速, m/s; n 为系数,一般取 0.25。

以乌东德水电站截流为例。该工程龙口宽度的确定要求在流量 $Q = 12\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,口门区流速不大于 4.0 m/s,落差不超过 1.0 m。根据以上公式计算出出口门宽度为 120 m 时,口门平均流速为 3.41 m/s,落差 0.86 m,冲刷深度为 0 m。在口门宽度为 110 m 时,口门平均流速为 3.71 m/s,落差 1.01 m,冲刷深度为 1.17 m。在口门宽度为 100 m 时,口门平均流速为 4.1 m/s,落差 1.18 m,冲刷深度为 3.15 m。

在流量为 $Q = 12\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$ 进行模型试验。试验结果见表 1。表 1 中数据显示,在水面宽度为 120 m 时,龙口流速和落差基本满足要求,但是当宽度减小为 110 m 时,流速和落差增加幅度不大,且考虑采用小石进占稳定性较好,断面平均流速在 4.0 m/s

以内,底部流速在 2.5 m/s 以下,底部覆盖层未出现大面积松动。继续进占至宽度为 100 m 时,龙口流速明显增加 4.57 m/s,落差陡增至 1.6 m,底部覆盖层有明显松动。故确定龙口宽度为 110 m 较为合适。因此,确定龙口宽度,需综合考虑流量、落差、流速以及覆盖层的稳定。

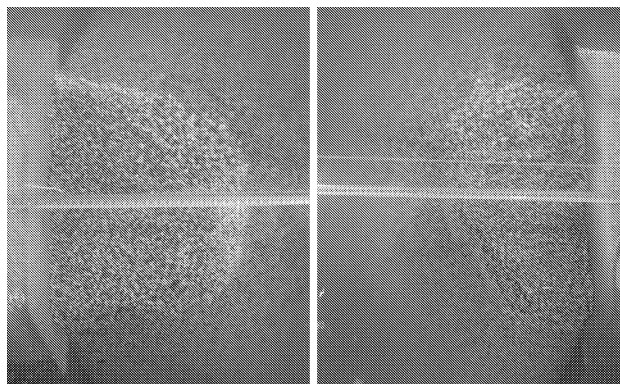
表 1 非龙口段不同口门宽度水力特征值($Q = 12\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$)

龙口宽度 /m	导流洞进口水 位/m	导流洞 流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	龙口 流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	龙口平 均流速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	龙口 落差 /m	冲刷 深度 /m
140	834.01	2540	10060	3.30	0.60	0.0
130	834.04	2615	9985	3.65	0.90	0.0
120	834.13	2846	9754	4.02	1.03	0.0
110	834.27	3205	9395	4.19	1.15	0.9
100	834.58	4000	8600	4.57	1.60	1.5

进一步对龙口进行抗冲试验发现,戽堤的不稳定一方面是由于底部覆盖层被淘刷后导致坍塌,另一方面戽堤本身堤头的冲刷也至关重要,且两者之间会产生相互影响。截流龙口形成后,为防止两侧戽堤裹头被冲刷,使戽堤变形,底部覆盖层被淘刷,导致戽堤结构不稳定甚至坍塌,需要对戽堤裹头进行防护。

乌东德试验中在确定龙口宽度后进行了裹头防护试验,试验对流量加大为 $12\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,裹头不防护和防护两种条件进行了对比。

(1) 试验 1:不防护。试验发现,冲刷 24 h 后,两边裹头上游角均出现松动,堤头形成一个斜角,上游迎水面冲走约长 15 m,戽堤中心线处往下游基本没有松动。对两侧戽堤上游角采用中石进行了防护,右侧防护范围为两侧上挑角上游迎水面长 15 m,左侧为 20.0 m,宽度至中心线处,形成一个三角形。冲刷 24 h 后戽堤形态见图 1。

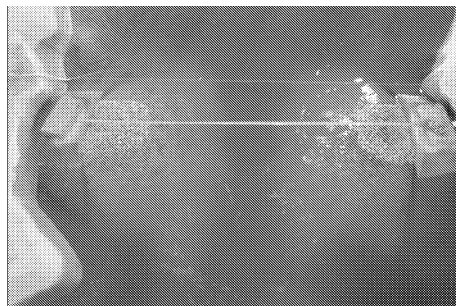


(a) 右堤头

(b) 左堤头

图 1 裹头防护保护形态变化过程图(试验 1)

(2) 试验 2:有防护。参考试验 1 堤头冲刷情况,在龙口达到 120 m 宽时两侧堤头均采用中石进占至 110 m,直接形成防护。之后进行防冲试验,冲刷 24 h 后,观测裹头防护效果。见图 2。



(a) 裹头形态



(b) 下游河床覆盖层形态

图 2 裹头防护保护形态变化过程图(试验 2)

直接在两侧堤头全断面采用 5.0 m 中石防护冲刷 24 h 后,堤头防护完好,未松动。戽堤内覆盖层冲刷深度约为 5 m。下游河床处产生冲坑,冲刷深度与试验一相当。由于戽堤下堤角少量覆盖层被冲走,下堤角抛投物出现少量流失。但戽堤未见出现大面积坍塌现象,流失的中石在底部河床形成防护,起到保护作用。对比试验 1 和试验 2 的结果,试验 2 采用裹头防护的方法不仅减小了流失量,而且防护的范围较小并可达到更好的效果。因此,对裹头进行必要的防护是降低截流风险的必要措施。

2.2 截流困难段与危险区域的判断受覆盖层因素影响

水流由上游区域进入龙口范围,水面束窄,流速急剧增大。由于戽堤上游角流速较高,且一般采用先进占上游角,中部和尾部在上游角形成的挑流保护作用下跟进的进占方法,因此,对于无覆盖层河床截流,戽堤上游角稳定性风险最高,采用的抛投料粒径一般略大于中部和尾部。但对于底部覆盖层抗冲能力较差的河床截流,龙口部位的河床不稳定易形成冲刷,并且随着龙口宽度减小,冲刷深度会随着流

速和落差的增加不断的增加。特别是龙口戽堤轴线以下部位,底部流速较高且水面下降较快,对覆盖层冲刷加强,在戽堤内及下游坡脚附近会形成一定范围的冲坑,从而影响到戽堤下游面安全。因此,对于在抗冲能力较差的河床截流时,除了重视上游角稳定性以外,更需要关注下游角稳定。试验研究过程中,戽堤进占采用从上游角先抛投,后部跟进的方法,上游角粒径大于中部,而在下游角进占时,又适当的加大了抛投材料粒径,并增加抛投量,使部分抛投物滚落至底部冲坑处对坡脚形成防护,从而保证下游坡脚稳定。

另外,对于一般河床截流,形成三角形过水断面前后,过水断面面积小,单宽流量大,流速高,落差大,此时为截流最困难阶段。而对于抗冲能力较差的深厚覆盖层河床截流时,在戽堤进占底部合拢形成三角形断面之前,戽堤稳定性风险最大。一方面底部合拢后,抛投料对底部覆盖层形成了防护,不会有继续下冲风险,另一方面底部合拢后,戽堤内底部由于抛投料的存在使底高程增加,高程逐渐高于戽堤后部冲坑高程,水流出戽堤后形成面流,对戽堤后部河床形成保护。因此在形成三角形龙口段面后,底部相对稳定。

在乌东德水电站截流试验研究中,基本方案条件下(流量 $7\ 280\ \text{m}^3/\text{s}$, 4 条导流洞参与分流)在龙口形成三角形断面前,龙口宽度 $80.0\ \text{m}$,龙口最大流速 $4.75\ \text{m/s}$,戽堤内河床覆盖层冲刷接近 $4\ \text{m}$,龙口下游出现冲坑,受此影响,戽堤下游堤头坡脚降低,滚落的抛投料不断填补冲坑,为了防止戽堤底部松动,在抛投过程中对该部位进行了重点关注并加大了抛投量。如图 3 所示。当龙口形成三角形断面后,如图 4 所示,一方面抛投料对戽堤内覆盖层起到了护底作用,另一方面随着底部抛投料的增加,底高程不断增加,主流越来越靠近水面,形成类似于跌坎的体型,戽堤下游冲坑处底部流速很小,几乎为零,从而对其后部覆盖层形成了保护作用。

2.3 戽堤进占量计算需考虑覆盖层流失

在立堵截流进占过程中,从龙口段的抛投量需要较为准确计算以保证备料充分和确定抛投强度,计算时还要考虑一定的抛投料流失。对于抗冲能力较差的深厚覆盖层河床截流,还需考虑进占过程中的河床床面冲刷引起的抛投量增加。河床覆盖层冲刷量的计算,需要首先通过计算或者模型试验确定

冲刷深度,在截流进占过程中,冲刷深度是逐渐变化的,所以计算需要分段进行。如图所示,假设每次进占长度为 ΔL ,戽堤高度为 H ,戽堤顶宽度为 W_1 ,不考虑冲刷时戽堤底宽 W_2 ,考虑冲刷后戽堤底宽 W'_2 。不考虑覆盖层冲刷的抛投量为 V_1 ,覆盖层流失量为 V_2 ,总抛投量为 V 。计算示意图见图 5。

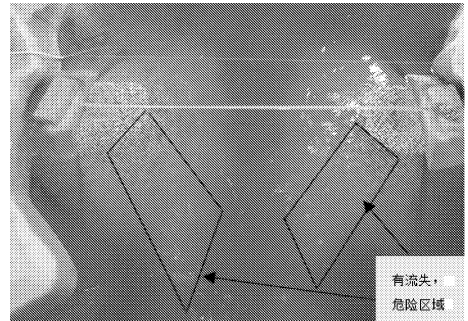


图 3 底部合拢前

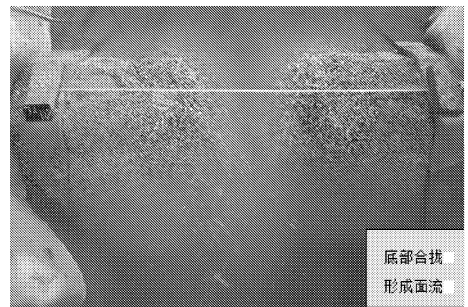


图 4 底部合拢后

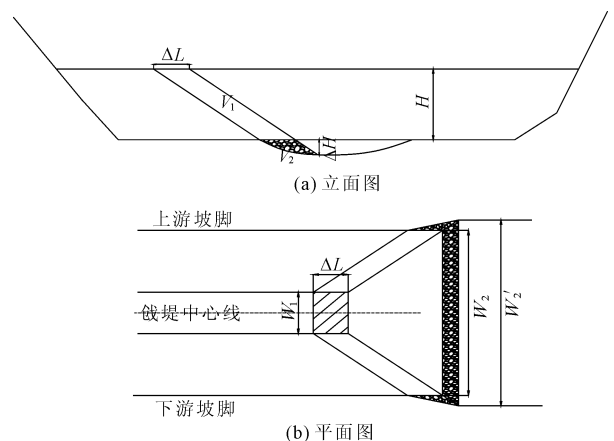


图 5 戽堤进占示意图

则:

$$V = V_1 + V_2 \quad (7)$$

$$V_1 = (W_1 \cdot \Delta L + W_2 \cdot \Delta L + \sqrt{(W_1 \cdot \Delta L) \cdot (W_2 \cdot \Delta L)}) \cdot \frac{H}{3} \quad (8)$$

$$V_2 \cong \frac{\Delta L \cdot \Delta H}{2} \cdot \frac{(W_1 + W_2)}{2} \quad (9)$$

举例:对于乌东德水电站截流试验研究中,基本方案(流量 $7\,280\text{ m}^3/\text{s}$,4条导流洞参与分流),戽堤顶高程 838.0 m ,顶宽 $W_1=30.0\text{ m}$,河床高程约为 810.0 m ,戽堤高 $H=28.0\text{ m}$,边坡为 $1:1.5$,计算出底宽 $W_2=W_1+3H=114\text{ m}$,龙口段进占从宽度 110 m 至 100 m 时,底部冲刷深度增加 2.0 m ,即 $\Delta H=2.0\text{ m}$ 。 $W'_2=W_1+3(H+\Delta H)=117\text{ m}$ 。

计算得 $V_1=18\,898\text{ m}^3$, $V_2=1\,155\text{ m}^3$ 。 $\frac{V_2}{V_1}\cdot 100\%=6\%$ 。即由于冲刷 2 m 增加的抛投量为 $1\,155\text{ m}^3$,相当于原抛投量的 6% 。且根据式(8)和式(9),当戽堤高度 H 较小,且冲刷深度 ΔH 较大时, V_2 占比将会进一步加大,在进行备料计算时是不可忽略的。

进占试验时抛投量统计基本相当。

3 结论

对于在抗冲能力较差且覆盖层深厚的河床进行截流的研究已经有大量的成果,并有了一些失败的教训和成功的经验作为参考。但是,在乌东德截流试验研究的过程中,有了几个不可忽视的新发现,本文对其做出了总结。截流过程中,无覆盖层河床截流的经验大多可以借鉴,但是覆盖层的存在会导致截流进占过程中一些因素发生变化。覆盖层冲刷对戽堤稳定的影响表现在多个环节,多个部位。比如文中研究所提到的截流龙口确定时,不仅需要考虑到龙口流量、流速、落差等因素,需要关注底部冲刷稳定情况;底部覆盖层流失也是截流困难段判定的主要因素,当底部合拢后,抛投料对底部形成防护,则截流难度下降;截流过程中,受戽堤下游覆盖层冲刷影响,易引起戽堤堤头下游角松动垮塌,使抛投量和抛投进占方式与无覆盖层河床不同;最后,在计算抛投量时,为保证备料充分,由于底部冲刷引起的流

失量一般不能忽略不计。

参考文献:

- [1] 黄德凡. 黄登水电站导截流工程主要地质问题及对策[J]. 水力发电, 2019, 45(6): 38-40.
- [2] 任海军, 高元太. 阿尔塔什水利枢纽工程深厚砂砾石覆盖层混凝土防渗墙施工技术研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 111-115.
- [3] 刘倩. 深厚覆盖层截流施工技术分析[J]. 水利科技, 2016(6): 2-10.
- [4] 何伟. 大石峡水利枢纽工程施工导截流方案[J]. 水利规划与设计, 2020(8): 103-107.
- [5] 张家健. 水利水电工程中的导截流技术[J]. 中国高新技术, 2021(9): 137-138.
- [6] 李登松, 戴光清, 金鑫, 等. 截流戽堤单向进占的局部冲刷三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2020, 35(4): 444-453.
- [7] 高利军. 官地水电站工程截流优化研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(6): 127-130.
- [8] 潘明鸿, 陈辉, 左永振, 等. 大藤峡水利枢纽二期围堰截流研究[J]. 中国水利, 2020(4): 48-50.
- [9] 刘生辉, 雷先进. 孤山航电枢纽一期截流施工关键技术[J]. 交通工程建设, 2018(2): 52-54.
- [10] 马作霖, 李家富. 苏洼龙水电站大江截流施工技术[J]. 四川水力发电, 2018, 37(6): 114-117.
- [11] 彭运河, 徐盛剑, 刘豫. 高落差大流量河道截流方案研究与实施[J]. 水利水电施工, 2018(3): 5-11.
- [12] 徐金良. 截流技术在水利施工技术应用分析[J]. 工程技术研究, 2018(5): 54-55.
- [13] 孙志禹, 陈先明, 朱红兵. 三峡工程截流技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(8): 785-795.
- [14] 杨承志, 王信成. 白鹤滩水电站截流设计与施工[J]. 水利水电施工, 2017(3): 11-16.
- [15] 陈虎. 减小水利枢纽工程截流施工难度措施的探讨[J]. 黑龙江水利, 2017, 3(4): 76-78.