

复杂水文地质条件下水电站上游围堰防渗处理关键技术研究

戴兴元

(中国葛洲坝集团电力有限责任公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要 为了应对深厚覆盖层的复杂地质条件和洪水周期长、洪峰流量大的复杂水文条件, 基于巴基斯坦 DASU 水电站上游围堰, 研究高压旋喷防渗墙和混凝土防渗墙的优缺点, 计算围堰的稳定性, 以期为类似围堰防渗处理提供有益参考。研究结果表明, 在复杂水文地质条件下, 相比于高压旋喷防渗墙, 混凝土防渗墙不仅具有更强的可靠性, 还可以缩短工期。

关键词 复杂水文地质条件; DASU 水电站; 围堰; 防渗处理

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.020

0 引言

建设水利水电枢纽是实现水资源调控、发展清洁能源的重要手段^[1]。围堰作为临时挡水建筑物, 其主要功能是围护枢纽永久建筑物占地范围形成基坑, 抽干基坑内积水以保障干地施工条件。这一临时结构的防渗性、稳定性与抗冲刷性能直接关系到主体工程的施工安全和工程质量。然而, 由于水利水电工程多选址于复杂地质区域, 围堰常面临深厚覆盖层、高水头等挑战, 尤其是由雪山融水引发的汛期洪水, 具有洪水周期长, 洪峰流量大的问题^[2], 其防渗性能的保障尤为关键。因此, 设计经济合理又安全可靠的围堰防渗结构, 成为水利工程建设中的关键技术难题。

目前主要的围堰防渗方案包括高压旋喷防渗墙^[3]和混凝土防渗墙^[4]等。虽然高压旋喷防渗墙具有适用地层广、施工简单、防渗作用范围大等优点, 但由于高压旋喷防渗墙高度依赖工艺设备的技术参数, 在多漂卵石深厚地层条件下, 工艺参数存在不确定性, 易导致围堰防渗质量波动及工期延误。例如: 新疆某引水发电岸边式厂房的围堰采用高压旋喷防渗墙施工来应对深厚砂砾石覆盖层, 施工过程中出现了塌孔、不返浆、较多较大孤石处灌浆不密实等问题。混凝土防渗墙因其渗透系数小、性能可靠、施工效率高等特点, 在围堰防渗体系中的应用越来越广泛^[5]。例如: 某水电工程^[6]河床覆盖层最大厚度约 45 m, 覆盖层物质为中细砂层、含漂砾石层、砂砾石层、粉质黏土层, 工程采用混凝土防渗墙作为主要防渗措施, 满足防渗和工期要求。然而, 目前的防渗墙工程主要用于由雨季引发的周期性水头。综上, 深厚覆盖层和雪融型大水头下的防渗墙工程少有研究。

本研究针对巴基斯坦 DASU 水电站上游围堰的防渗问题, 通过对比分析研究高压旋喷防渗墙和混凝土防渗墙在应对深厚覆盖层和雪融型大水头条件下的防渗问题, 为应对复杂地质水文条件下的围堰防渗工程提供借鉴。

1 工程概况

DASU 水电站项目位于巴基斯坦开伯尔普赫图赫瓦省科希斯坦区镇印度河流域, 为属 I 等大(1)型工程。项目主体由四大核心结构组成: 242 m 高的 RCC 拱形重力坝(建基面高程 715.0 m, 坝顶高程 957.0 m, 轴线长 570 m)构成挡水系统, 其碾压混凝土总量达 432 万 m³, 月高峰浇筑强度 20 万 m³; 泄洪系统配置 9 个低位泄水孔、8 孔溢洪道及两岸冲砂洞; 发电系统通过左岸 5 个进水口引水, 经压力隧洞输送至地下厂房(布置 15 台单机 360 MW 机组), 以及上、下游围堰及左岸三条特大断面导流洞组成的导流建筑物。DASU 水电站是目前为止巴基斯坦建成的技术难度最大、总装机容量和总投资最大的水电项目, 将大幅改善巴基斯坦能源结构。

2 地质水文条件

DASU 上游河床覆盖层厚度约为 45 m, 如图 1 所示。从河床底部到基岩顶部主要分为 2 层。上部为 15 m 厚的砂砾石、鹅卵石(粒径 3~20 cm)及砂的混合物; 下部为 30 m 厚的漂砾层, 直径大于 0.9 m, 平均粒径约 2.0 m。

DASU 水电站年均降雨量仅 185 mm, 降水高度集中于 12 月至次年 3 月(占全年 90% 以上), 其中 2 月为降雨峰值月。每年 4 月下旬至 10 月中旬为汛期, 持续约 180 天, 主要依赖雪山融水补给。DASU 水电站的洪

峰达到 $9\ 979\ m^3/s$, 显著大于拉哇^[7]、巴塘^[8]和汗华水电站, 如表 1 所示。相比于降雨型洪水, 融雪型洪水具有更长的汛期和更大的洪峰。长汛期和大洪峰意味着围堰工程工期短和防渗要求高。

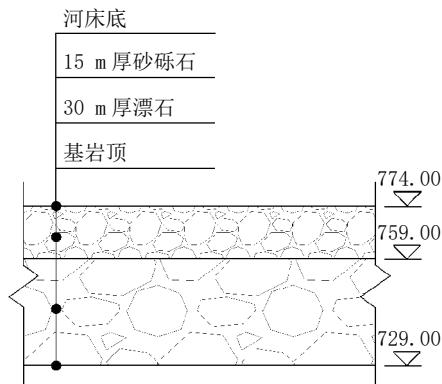


图 1 DASU 上游河床覆盖层

表 1 不同水电站水文条件

	DASU	拉哇	巴塘	汗华
汛期(月数)	4	4	3	3
洪峰(m^3/s)	9 979	6 330	6 780	3 750
洪水成因	融雪型	融雪型	降雨型	降雨型

3 防渗方案的技术对比

3.1 高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合方案

3.1.1 方案概况

图 2 说明了围堰基础防渗采用高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合方案。高压旋喷灌浆段(高程 760 m 至 740 m)设计为双排布置, 桩径 1.8 m、孔距 1.4 m、排距 1.45 m, 成墙厚度 3.2 m, 选用 QDG-2 全液压钻机进行跟管钻进(卵砾石层工效 1.5 m/h), 配合 SGP30-5 高喷台车实施二管法喷射(工效 1.65 m/h), 钻孔后采用泥浆护壁并分序喷射。帷幕灌浆段(高程 740 m 至 710 m)为三排布置, 孔距 1.2 m、排距 0.8 m, 使用 XY-2 地质钻在砂砾石层(工效 0.5 m/h)和基岩段(工效 1.0 m/h)钻孔, 钢管跟管钻进后采用 3SNS 灌浆泵自下而上分段卡塞纯压灌浆。

高压旋喷灌浆需完成钻孔 2 203 m, 配置 2 台钻机 24 小时作业需 31 天, 喷射工序滞后钻孔 14 天启动; 帷幕灌浆钻孔总量 9 690 m, 单台设备需 337 天, 为压缩工期至 60 天需配置 12 台地质钻机(10 台钻孔、2 台灌浆)。

3.1.2 可行性分析

高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合方案具有可快速处理局部薄弱区域, 施工灵活, 效率高等优点。然而,

根据 DASU 河道的地质和水文条件, 高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合方案存在三大问题: 帷幕灌浆成孔难度大; 高喷灌浆与下部帷幕灌浆处灌浆压力参数难确定; 钻孔工作量大。

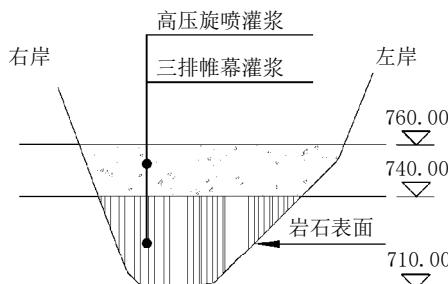


图 2 高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合

1. 砂砾石/鹅卵石层中帷幕灌浆钻孔成孔难度大, 灌浆参数复杂多变, 施工质量要求高, 遇到漂石层灌浆效果较差, 整体灌浆效果不理想。工期控制不利, 可能会出现多次重复性灌浆。

2. 高喷灌浆与下部帷幕灌浆处灌浆压力参数难以确定。灌浆压力过大可能会破坏上部高喷墙体, 若压力过小, 则下部灌浆效果可能不理想, 施工不当易造成渗漏通道。

3. 基岩段的帷幕灌浆设计为三排, 具有较大的钻孔量。52 个孔需从 780 m 高程开始钻孔, 钻孔工作量达到 9 690 m。较大的钻孔工作量对人员组织和设备数量要求较高。因此, 基岩段设计三排帷幕灌浆难以保证围堰施工的短工期需求。

因此, 高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合方案理论上基本可行, 但实施难度大, 工期控制难度大。

3.2 混凝土防渗墙与单排帷幕灌浆组合方案

3.2.1 方案概况

覆盖层采用 80 cm 厚普通混凝土防渗墙, 墙下由三排改为单排基岩帷幕灌浆, 灌浆孔距由 1.4 m 改为 1.2 m。混凝土采用 C20 的素混凝土, 防渗等级为 W6, 入岩深度 1 m。如图 3 所示。该设计方案具有实施简单, 施工技术参数控制单一, 可靠性更强。

3.2.2 可行性分析

混凝土防渗墙(面积 $2\ 144.0\ m^2$)配合墙下基岩帷幕灌浆(630 m), 施工效率显著提升。防渗墙采用 CZ-22 型冲击钻“钻劈法”成槽(砂砾石层工效 400 工时 / $100\ m^2$), 12 个槽段分两期施工, 配置 8 台钻机可在 45 天内完成; 帷幕灌浆采用 XY-2 地质钻(工效 1.0 m/h), 4 台设备 10 天即可完成。

相较于高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合方案, 混凝土防渗墙与单排帷幕灌浆组合方案通过预埋钢管免除了防渗墙体内钻孔工序, 可以缩短基础处理的工

期20天，不仅实施性更强、风险更低，还为后续主体工程提前开挖创造了有利条件。

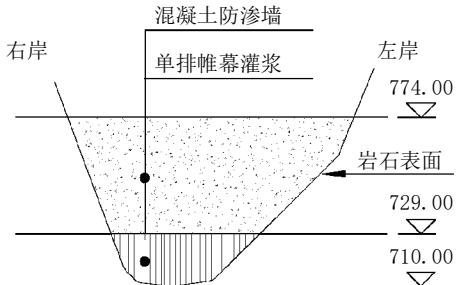


图3 混凝土防渗墙与单排帷幕灌浆组合

4 围堰稳定性分析

上游过水围堰采用随机压实回填，外包钢筋混凝土面板，如图4所示，坝体稳定性计算选用最大断面进行校核。围堰顶宽42.0 m，底宽107.4 m，高11.0 m，漫水面坡比1:2，下游面坡比1:4。围堰顶高程785.0 m，基础面高程774.0 m；最高水位高程792.0 m，计算水位高程差18.0 m。回水水位高程780.5 m，计算回水水位标高程差6.5 m。

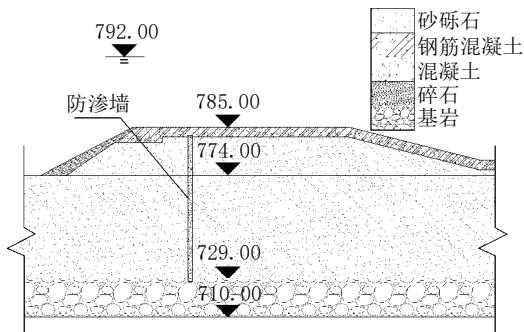


图4 上游围堰稳定性计算断面

上游围堰的受力如图5所示。按照美国陆军工程兵团发布的重力坝设计规EM-1110-2-2200《Gravity Dam Design》，需验证围堰抗滑稳定性及地基承载力。其中抗滑稳定性计算见式(1)：

$$FS \leq \frac{N' \tan \phi + cl}{T} \quad (1)$$

式(1)中： FS 为安全系数，最小取2； c 为楔体滑移面内聚力，取0； N' 为垂直于假定滑动面的合力，kN； l 为滑动面的长度，取m； T 为与滑动面相切的力，kN。

通过计算， $FS=2.0 < 2.59$ ，满足设计要求。地基承载力计算见式(2)：

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} = \frac{\sum N}{A} \pm \frac{\sum M}{W} \quad (2)$$

式(2)中： $\sum N$ 为作用在基座上的合力法向分量之和，kN； $\sum M$ 为绕中性轴的力矩之和，kN·m； A 为

基底面积， m^2 ； W 为基地截面模量，取 m^3 。

通过计算， $FS=51.31 \text{ kPa} < 200 \text{ kPa}$ ，满足设计要求。

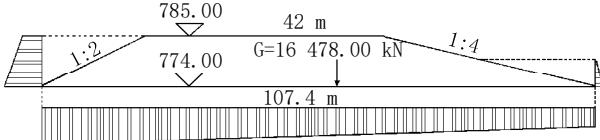


图5 上游围堰受力图

经计算，本项目设计的宽顶堰前水头为8.28 m(水位791.28 m)，堰角收缩水深2.43 m(水位776.43 m)，因堰角流速较高易引发冲刷，导致围堰失稳，故在下游堰角后设置厚度2.0 m、长度46.0 m、高度4.0 m的钢筋混凝土消力墩形成消力池以稳定水流。

5 结束语

针对深厚覆盖层和雪融型大水头的复杂水文地质条件，基于巴基斯坦DASU水电站上游围堰，对比研究了高压旋喷防渗墙和混凝土防渗墙的优劣，并计算了围堰的稳定性。结果表明，在复杂水文地质条件下，相比于高压旋喷防渗墙，混凝土防渗墙具有更优的防渗性，且可缩短工期。

参考文献：

- [1] 樊启祥, 安瑞楠, 王小明, 等. 绿色水电开发内涵、动态演化模型与关键技术[J]. 水力发电学报, 2025, 44(09): 35-52.
- [2] 常以民. 融雪洪水区域水库截流度汛措施分析与研究[J]. 四川水利, 2021, 42(04): 156-160.
- [3] 赵健飞, 孙青秀. 高压旋喷防渗墙在多漂卵砾石围堰地基中的应用[J]. 西北水电, 2024(02): 78-81, 98.
- [4] 张江. 大孤石透水地层围堰混凝土防渗墙施工技术[J]. 四川水利, 2024, 45(S2): 38-42.
- [5] 黄志安. 复杂地质条件下水利工程防渗排水设计与稳定性分析[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(07): 1-8.
- [6] 拓瑜, 王昊, 叶兴国. 冲击钻法在复杂地层混凝土防渗墙中的应用[J]. 设备管理与维修, 2025(10): 137-140.
- [7] 田应辉, 王迎, 吴文洪, 等. 深厚粘性土地基上建高围堰设计关键技术问题[J/OL]. 中国农村水利水电, 1-12[2025-08-07]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=ZHE1803t14vKZDPu-nvd50JKNyDG6T39TgU4NmJUwItysuLQX8G_IIubBAzbQ3xyb5oYNeYZiCRrVkpHBpqmIm_QE3a5A2gOs0YSWKApjMbZ32ZZDeEUdxfBgZx14i38w9pM_AGebxL9j04spVr-KDysJ3shyLr1i4paUCQAYhF-k7FICPMDQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [8] 苏鹏. 大型水利枢纽工程复杂地质条件下土石围堰稳定性分析研究[J]. 东北水利水电, 2025, 43(06): 1-2.