

XIAOLANGDI

小浪底水利枢纽

渗控工程建设实践

董德中 薛喜文 祁志峰 李立刚 廖波 编著



SHUILI SHUNIU SHENKONG
GONGCHENG JIANSHE SHIJIAN



黄河水利出版社

小浪底水利枢纽渗控工程建设实践

董德中 薛喜文 祁志峰

编著

李立刚 廖 波

黄河水利出版社

内 容 提 要

小浪底水利枢纽工程在黄河治理开发中的地位及复杂的地质条件,决定了其渗控工程的重要性和复杂性。本书介绍了渗控工程的设计思想、施工特点,系统总结了蓄水初期渗漏处理的成功经验,重点阐述了渗漏原因分析、渗漏途径探测与研究,以及防渗处理措施等方面的经验,对类似工程的建设管理有一定的参考和借鉴价值。

本书可供从事水利水电工程建设管理、设计、施工、监理等方面的专业技术人员和高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

小浪底水利枢纽渗控工程建设实践 / 董德中等编
著. — 郑州: 黄河水利出版社, 2007.12
ISBN 978-7-80734-388-2

I. 小… II. 董… III. 黄河-水利枢纽-渗流控制-
水利工程-洛阳市 IV. TV632.613

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 202975 号

出 版 社: 黄河水利出版社

地址: 河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码: 450003

发行单位: 黄河水利出版社

发行部电话: 0371-66026940

传真: 0371-66022620

E-mail: hhsclbbs@126.com

承印单位: 黄河水利委员会印刷厂

开本: 787 mm × 1 092 mm 1 / 16

印张: 14.75

字数: 340 千字

印数: 1—1 500

版次: 2007 年 12 月第 1 版

印次: 2007 年 12 月第 1 次印刷

定价: 36.00 元

前 言

小浪底水利枢纽位于河南省洛阳市北 40 km 黄河最后一道峡谷出口处,上距三门峡水利枢纽 130 km,下距郑州花园口 128 km,坝址处控制流域面积 69.4 万 km^2 ,占黄河流域面积的 92.3%,是治理黄河的控制性骨干工程之一。工程开发目标为“以防洪(包括防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电,蓄清排浑,除害兴利,综合利用”。

小浪底水利枢纽为大(1)型工程,枢纽主要建筑物为一级建筑物,由大坝、泄洪排沙系统和引水发电系统组成。大坝为黏土斜心墙堆石坝,最大坝高 160 m,坝顶长 1 667 m;泄洪排沙系统包括进水塔群,3 条直径为 14.5 m 的孔板消能泄洪洞,3 条断面尺寸为 $(10.0 \sim 10.5)\text{m} \times (11.5 \sim 13.0)\text{m}$ 的明流泄洪洞,3 条直径为 6.5 m 的排沙洞,1 座正常溢洪道和 1 座两级消能的消力塘;引水发电系统包括 6 条直径为 7.8 m 的引水发电洞,1 座长 251.5 m、跨度 26.2 m、最大开挖高度 61.4 m 的地下厂房,1 座主变室,1 座尾水闸门室和 3 条断面为 $12.0\text{m} \times 19.0\text{m}$ 的尾水洞,1 座 6 孔防淤闸,1 座 $228.5\text{m} \times 153.0\text{m}$ 的 220 kV 地面式开关站,装机容量 1 800 MW,设计多年平均发电量 51 亿 kWh。

小浪底水利枢纽主体工程于 1994 年 9 月 12 日开工建设,1997 年 10 月 28 日实现大河截流,1999 年 10 月 25 日水库下闸蓄水,2000 年 1 月 9 日第一台(6 号)机组并网发电,2001 年 12 月 31 日最后一台(1 号)机组并网发电,主体工程全部完工。截至 2006 年 12 月 31 日,水库最高蓄水位达到 265.69 m,距正常蓄水位 275 m 仅差 9.31 m,枢纽所有建筑物均投入了运行,巡视检查和安全监测结果表明,枢纽各建筑物运行正常。

小浪底水利枢纽初期蓄水运用以来取得了显著的综合效益,水库及黄河下游已连续 7 年实现了安全度汛。特别是 2003 年“华西秋雨”期间,在与有关水库联合运用的情况下,减少了下游洪灾损失约 110 亿元;有效地解除了黄河下游凌汛灾害;水库至 2006 年底共拦蓄泥沙 20.6 亿 m^3 ,对下游河道起到了有效的减淤作用;通过水库调节保证了黄河下游不再断流,提高了下游灌溉用水保证率,并为引黄济津、引黄济青、引黄济淀提供了稳定水源;小浪底电站安装了 6 台 300 MW 水轮发电机组,总装机容量 1 800 MW,为河南电网调峰、调频和保障电网安全发挥了重要作用;保证了黄河下游及入海口的生态需水量,显著改善了黄河下游生态环境。

小浪底水利枢纽在渗控工程设计中,充分考虑黄河泥沙形成天然铺盖对防渗的有利作用,采用了以“垂直防渗为主、水平防渗为辅”的双重防渗体系。坝基覆盖层采用混凝土防渗墙防渗,通过内铺盖与水库泥沙淤积形成的天然铺盖相连,作为水平辅助防渗体系。两岸山体按照“前堵后排、堵排结合、以排为主”的渗控设计原则,除断层区外均布置单排灌浆帷幕,并深入到相对弱透水岩层,形成悬挂帷幕;同时,为降低两岸山体的地下水位,在灌浆帷幕后布置了排水系统。

在小浪底水利枢纽初期蓄水运用过程中,由于地质条件的复杂性,先后发现两岸坝肩山体及河床坝基渗透问题,表现出层状渗漏、带状渗漏和壳状渗漏的特性。结合水文

地质条件，认为产生渗漏的主要原因是悬挂式帷幕、帷幕体单薄、主要构造呈上下游方向展布、库水入渗边界长、承压含水层得到充分补给等。针对渗漏问题，邀请国内水利行业知名专家召开咨询会，开展左岸山体渗流场、坝基渗漏途径及渗流稳定性研究；采用同位素综合示踪法和地球物理瞬变电磁法等探测方法，展开了电导场、温度场、同位素示踪以及连通试验等多项试验，查找出了较为确切的渗透途径，为采取防渗处理措施提供了可靠依据；根据研究和探测结论以及不同阶段的渗漏特性，结合水文地质条件，采取了防渗补强措施，并在施工中采取多项新技术、新材料、新工艺。监测结果表明，防渗处理取得了明显的效果，通过了国家有关部门进行的专题安全鉴定和技术评估，因此可以认为小浪底水利枢纽渗漏问题已经解决，不影响枢纽建筑物的安全稳定运行。

为总结小浪底水利枢纽渗控工程建设经验，推广新技术、新材料的应用，为其他类似问题的处理提供参考与借鉴，编写了《小浪底水利枢纽渗控工程建设实践》一书。本书共分九章，第一章简要介绍小浪底水利枢纽工程概况及初期运用情况，第二章介绍渗控工程设计，第三章介绍渗控工程施工，第四章介绍水库蓄水初期渗漏特性及渗控措施，第五章介绍渗漏途径的探测与研究，第六章介绍渗控补强加固工程措施，第七章介绍渗漏对建筑物安全性影响评价分析，第八章介绍渗控工程措施采用的新技术，第九章对防渗处理措施进行了总结。

小浪底水利枢纽防渗处理取得了显著效果，是众多单位、广大科技工作者共同努力工作的结果。在编写本书过程中，小浪底工程咨询有限公司原总经理李其友、教授级高工罗鲁生，黄河勘测规划设计有限公司设计总工林秀山、教授级高工高广淳，河海大学陈建生教授，中国地质大学万力教授等给予了指导和帮助，在此表示衷心的感谢。同时，感谢黄河水利出版社岳德军总编对本书出版的支持。由于编者的水平有限，书中难免有错误和不足之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2007 年 10 月

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 工程概况	(1)
第二节 初期运用和发挥的效益	(3)
第三节 枢纽渗控工程简述	(4)
第二章 渗控工程设计	(6)
第一节 工程地质与水文地质条件	(6)
第二节 大坝渗控体系	(22)
第三节 渗控工程设计	(28)
第三章 渗控工程施工	(37)
第一节 河床基础防渗施工	(37)
第二节 两岸山体防渗帷幕施工	(47)
第三节 主坝填筑施工	(56)
第四章 水库蓄水初期渗漏特性及渗控措施	(63)
第一节 蓄水初期水库渗漏情况	(63)
第二节 蓄水初期渗漏特性分析	(64)
第三节 蓄水初期渗控工程措施	(67)
第四节 蓄水初期渗控工程措施实施效果	(79)
第五章 渗漏途径的探测与研究	(81)
第一节 探测方法及原理	(81)
第二节 地球物理探测	(85)
第三节 温度场与电导分析	(96)
第四节 同位素示踪广义稀释方法测定地下水流	(116)
第五节 环境同位素和水化学分析	(127)
第六节 密度、水位、吕容值及排水量的分析	(135)
第七节 连通试验	(141)
第八节 探测主要结论	(146)
第六章 渗控补强加固工程措施	(149)
第一节 渗控补强加固工程措施概述	(149)
第二节 渗控补强加固工程施工	(162)
第七章 渗漏对建筑物安全稳定性影响评价分析	(173)
第一节 渗漏处理的效果分析	(173)
第二节 水库正常蓄水位时渗漏量预测	(186)

第三节	渗漏对建筑物安全稳定性影响分析	(188)
第四节	渗漏对建筑物的安全稳定性评价	(195)
第八章	渗控工程措施采用的新技术	(199)
第一节	主坝混凝土防渗墙施工技术	(199)
第二节	主坝基础灌浆施工技术	(202)
第三节	高压旋喷灌浆施工技术	(215)
第四节	主坝填筑施工技术	(219)
第九章	结 论	(222)
参考文献		(226)

第一章 绪 论

第一节 工程概况

一、工程位置

黄河小浪底水利枢纽工程(以下简称小浪底工程)是治理开发黄河的控制性骨干工程之一,坝址位于河南省洛阳市以北 40 km 的黄河干流上,上距三门峡水利枢纽 130 km,下距郑州花园口 128 km,控制流域面积 69.4 万 km^2 ,占黄河全流域面积的 92.3%。

二、工程开发目标

小浪底工程开发目标是“以防洪(包括防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电,蓄清排浑,综合利用,除害兴利”。

小浪底水库总库容 126.5 亿 m^3 ,其中拦沙库容 75.5 亿 m^3 ,防洪库容 40.5 亿 m^3 ,调水调沙库容 10.5 亿 m^3 。小浪底工程投入运行后,可保持长期防洪库容 40.5 亿 m^3 ,与三门峡、陆浑、故县水库联合运用,遇百年一遇洪水,花园口站洪峰流量为 15 700 m^3/s ;遇千年一遇洪水,花园口站洪峰流量为 22 600 m^3/s ;与三门峡水库联合运用,可基本解除下游凌汛威胁;采用初期拦沙和后期蓄清排浑运用方式,利用水库 75.5 亿 m^3 的拦沙库容和 10.5 亿 m^3 的调水调沙库容,在 50 年运用期相当于约 25 年内下游河床不再抬升;多年平均增加年调节水量 17.9 亿 m^3 ,可提高 4 000 万亩(1 亩=0.067 hm^2)耕地的灌溉保证率,改善下游城市及工农业供水条件;安装 6 台 300 MW 水轮发电机组,总装机容量 1 800 MW,设计多年平均年发电量 51 亿 kWh,其中,前 10 年为 45.99 亿 kWh,10 年后为 58.51 亿 kWh。

三、工程设计参数

小浪底工程大坝为壤土斜心墙堆石坝,最大坝高 160 m,总库容 126.5 亿 m^3 ,水电站装机容量 1 800 MW,为大(1)型工程,枢纽主要建筑物为一级建筑物。

(一)洪水

百年一遇洪水导流, 27 500 m^3/s ;

千年一遇洪水设计, 40 000 m^3/s ;

万年一遇洪水(同 PMF)校核, 52 300 m^3/s 。

(二)径流

小浪底水库多年平均入库水量 281.46 亿 m^3 ,扣除库区南岸灌溉引水量 4.23 亿 m^3 ,年设计径流量为 277.2 亿 m^3 。

(三)泥沙

小浪底水库设计多年平均入库沙量为 13.23 亿 t, 实测最大含沙量 941 kg/m^3 。

(四)水位

正常蓄水位, 275 m;

设计洪水位, 274 m;

校核洪水位, 275 m;

水库正常死水位, 230 m;

水库非常死水位, 220 m;

水库防凌运用限制水位, 267 m。

(五)库容

总库容, 126.5 亿 m^3 ;

其中: 防洪库容, 40.5 亿 m^3 (254 m 水位以上);

调水调沙库容, 10.5 亿 m^3 (水位 226 ~ 254 m);

淤沙库容, 75.5 亿 m^3 。

(六)枢纽实际泄流能力

正常蓄水位 275 m 时最大泄流能力, 17 559 m^3/s ;

正常死水位 230 m 时泄流量, 8 048 m^3/s ;

非常死水位 220 m 时泄流量, 7 056 m^3/s 。

四、枢纽主要建筑物

小浪底工程为大(1)型工程, 主要建筑物为一级建筑物。枢纽工程由主坝、泄洪排沙系统和引水发电系统组成。主坝为壤土斜心墙堆石坝, 最大坝高 160 m, 坝顶长 1 667 m, 坝基砂卵石覆盖层采用 1.2 m 厚混凝土防渗墙防渗, 伸入基岩不小于 1 m, 两岸坝肩岩体采用水泥灌浆帷幕防渗; 泄洪排沙系统包括进水塔群, 3 条直径为 14.5 m 的孔板消能泄洪洞, 3 条断面尺寸为 $(10.0 \sim 10.5) \text{ m} \times (11.5 \sim 13.0) \text{ m}$ 的明流泄洪洞, 3 条直径为 6.5 m 的排沙洞, 1 座正常溢洪道和 1 座两级消能的消力塘; 引水发电系统包括 6 条直径为 7.8 m 的引水发电洞, 1 座长 251.5 m、跨度 26.2 m、最大开挖高度 61.4 m 的地下厂房, 1 座主变室, 1 座尾水闸门室和 3 条断面尺寸为 $12.0 \text{ m} \times 19.0 \text{ m}$ 的尾水洞, 1 座 6 孔防淤闸, 1 座 $228.5 \text{ m} \times 153.0 \text{ m}$ 的 220 kV 地面式开关站。安装 6 台 300 MW 的水轮发电机组。枢纽主要建筑物布置如图 1-1 所示。

五、建设过程

小浪底工程建设部分利用世界银行贷款, 土建主体工程实行国际招标, 建设管理全面推行项目法人责任制、招标投标制、建设监理制和合同管理制。

前期准备工程于 1991 年 9 月 1 日开工建设, 主体工程于 1994 年 9 月 12 日开工建设, 1997 年 10 月 28 日实现大河截流, 1999 年 10 月 25 日水库下闸蓄水, 2000 年 1 月 9 日第一台(6 号)机组并网发电, 2001 年 12 月 31 日最后一台(1 号)机组并网发电, 主体工程全部完工。经过参建各方的共同努力, 创造了工期提前、投资节约、质量优良的业绩。

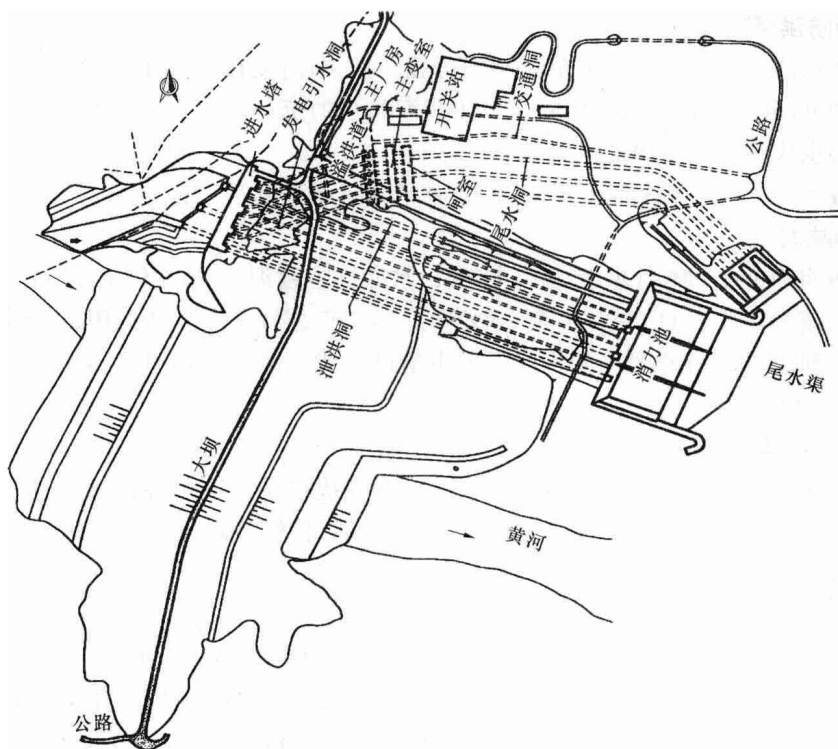


图 1-1 枢纽主要建筑物平面布置图

第二节 初期运用和发挥的效益

一、枢纽初期运用概况

小浪底工程 1999 年 10 月 25 日水库下闸蓄水，所有建筑物全部投入运行。水库最高蓄水位达 265.69 m(2003 年 10 月 15 日)，离设计正常蓄水位(275 m 高程)仅差 9.31 m；截至 2006 年底，水库在较高库水位 260 m 以上累计运行 189 天，在库水位 250 m 以上累计运行 696 天；3 条排沙洞启闭闸门共 2 632 次，累计过流时间 24 330 小时；3 条明流洞启闭闸门共 643 次，累计过流时间 2 927 小时；3 条孔板洞启闭闸门共 162 次，累计过流时间 167 小时；正常溢洪道启闭闸门 27 次，累计过流时间 97 小时；电站在电力系统中担负调频、调峰和事故备用任务，运行安全稳定。

自 2002 年开始，每年汛前进行集中调水调沙运用，泄洪建筑物经受了大流量下泄的考验。大坝及枢纽主要建筑物初步经受了较高库水位运用的考验。

小浪底工程建立了完善的安全监控系统，安全监测和巡视检查结果表明，枢纽各建筑物运行正常。

二、初期运用发挥的效益

(一)防洪(防凌)

自小浪底水库下闸蓄水开始,枢纽即投入防洪(防凌)初期运用,连续7年安全度汛。特别是2003年“华西秋雨”期间,按照黄河防总的统一调度,与有关水库联合运用,减少了下游洪灾损失约110亿元。

小浪底工程投入运行后,有效地解除了黄河下游凌汛灾害。

(二)减淤

1999年10月下闸蓄水至2006年底,水库共拦蓄泥沙20.6亿 m^3 ,对下游河道起到了有效的减淤作用。自2002年至2006年连续5年进行调水调沙运用,有效地减少了小浪底水库和下游河道的泥沙淤积,下游主槽过流能力由原个别河段不足 $1800\text{m}^3/\text{s}$ 全线提高至 $3500\text{m}^3/\text{s}$ 。

(三)供水与灌溉

小浪底工程的建成投运,为下游供水、灌溉提供了先决条件,通过科学调度,保证了黄河下游不断流,缓解了黄河下游旱情,提高了下游灌溉用水保证率,并为引黄济津、引黄济青、引黄济淀提供了稳定水源。

(四)发电

小浪底电站在系统中担任调峰、调频和事故备用任务,从2000年1月首台机组并网发电至2006年底,累计发电256亿 kWh ,有效缓解了河南电网用电紧张局面,并提高了电网供电质量。期间年最高发电量58亿 kWh (2006年)。

(五)生态环境效益

小浪底工程的建成投运,为确保黄河下游不断流、维护黄河健康生命奠定了基础。通过合理调度,保障了黄河下游及入海口的生态需水量,大大改善了黄河下游生态环境。

小浪底工程先后被国家有关主管部门命名为“国家环境保护百佳工程”、“开发建设项目水土保持示范工程”、“国家水利风景区”。

第三节 枢纽渗控工程简述

小浪底工程坝址区河床覆盖层深厚,右岸滩地开阔,左岸山坡陡直,大坝为壤土斜心墙堆石坝。由于黄河独特的水沙条件和两岸山体的地形特点,所有泄洪排沙和引水发电建筑物全部布置在左岸,设计中将左岸山体作为大坝的延伸。

在小浪底工程渗控设计中,充分考虑了黄河泥沙形成天然铺盖对防渗的有利作用,采用“以垂直防渗为主、水平防渗为辅”的双重防渗体;大坝采用壤土斜心墙防渗,坝基覆盖层采用混凝土防渗墙防渗,并插入黏土心墙内12m,作为主要垂直防渗体系;壤土心墙通过内铺盖与上游围堰防渗体系及黄河泥沙形成的天然铺盖相连,作为水平辅助防渗体系;两岸山体采用“前堵后排、堵排结合、以排为主”的渗控布置原则,灌浆帷幕除断层区以外,均为单排帷幕,且深入相对弱透水岩层,布置为悬挂帷幕;同时考虑到左岸山体洞室密布及右岸有承压水,在两岸山体帷幕后均布置了排水幕,以降低山体

中的地下水位。

按照渗控设计原则和施工进度安排,在水库蓄水前,渗控工程施工完成了坝基混凝土防渗墙和两岸坝肩山体灌浆帷幕工程,排水工程施工全部完成。

小浪底水库 1999 年 10 月下闸蓄水,蓄水初期运用表明,水库渗漏以沿上下游方向展布的断裂构造而形成的带状渗漏和沿裂隙发育的硅钙质砂岩层层状渗漏为主要特征,渗水量比三维渗流计算值偏大。主要原因是岩层的节理裂隙均呈 80° 左右的陡倾角,单排垂直孔帷幕灌浆效果不佳,难以封闭所有的裂隙;左岸灌浆帷幕深度不够,且受洞群交叉的影响。为此,在水库蓄水后,根据渗漏情况及水文地质条件,调整了灌浆帷幕布设原则:一是对未进行帷幕灌浆施工的部位进行加强和加深,如左岸山体帷幕由 1 排孔增加为 2 排孔,并将帷幕深度由 210 m 降低到 130 m,右岸 1 号灌浆洞帷幕由 1 排孔增加为 2 排孔;二是对具备补强条件的帷幕进行了补强,如右岸 2 号及左岸 3 号、4 号灌浆洞在原已施工完成的一排帷幕基础上增加一排帷幕,并把 3 号和 4 号灌浆洞内帷幕深度由高程 130 m 加深到 80 m。灌浆帷幕实施完成后,在水库 235 m 水位下,排水洞渗水量明显减少,如右岸 1 号排水洞渗水量减少 24.35%~40.6%,左岸 30 号排水洞渗水量减少 19.11%~31.10%。

在水库水位超过 235 m 后,排水洞渗水量有所增大。结合工程地质条件,认为右岸 1 号排水洞渗水量增加是由于渗压水头增加,渗水机理已基本清楚,随着坝前泥沙淤积的进一步发展,待透水岩层出露面被泥沙淤积覆盖后,渗水量将逐渐减少;左岸排水洞渗水量增加是由于渗透面积增加和渗压水头增加双重因素引起的,在渗水量随水库水位上升而增大的情况下,渗漏处理存在盲目性。为保证左岸山体的稳定,采用同位素综合示踪法和瞬变电磁法对左岸山体渗漏通道进行了探测与研究。根据探测结果,对重点部位有针对性地进行灌浆帷幕补强加固,如封堵 F_{28} 断层进口、左岸岸坡“三角区”帷幕补强、集中渗漏通道 TD1 与 TD2 封堵等。重点部位灌浆帷幕补强加固取得了明显效果,例如 2 号排水洞渗水量减少约 96%。

2003 年受“华西秋雨”影响,水库水位达到蓄水运用以来的最高水位 265.69 m,为减少地下厂房顶拱的渗漏水量,保证地下厂房及发电、供电设备的安全运行,对左岸山体帷幕进一步补强加固,同时加密排水洞排水幕,增加排水量,以降低左岸山体地下水位。渗控工程实施完成后,左岸山体渗水量减少约 48%。

渗控工程措施实施完成后,组织召开了渗控工程设计、渗漏处理及安全性评价专家咨询会,同时进行了渗控专题安全鉴定,认为小浪底水利枢纽的渗漏问题已经解决,不影响枢纽安全稳定运行。

第二章 渗控工程设计

第一节 工程地质与水文地质条件

一、地形地貌

小浪底水利枢纽坝址位于黄河中游最后一个峡谷的出口，处于豫西山地和山西高原的接壤部位。西部和北部属太行山系，南部属于秦岭余脉崤山山系。黄河由西向东出峡谷后逐渐展宽，坝址处河谷宽约 800 m，河床右岸为滩地和黄土二级阶地，山势陡峻，高程在 380~420 m，坡度为 40°~50°；左岸山势平缓，高程为 290~320 m，且有高程为 240 m 左右的垭口。

左岸坝轴线附近临河山头高程 290~300 m，在向北直到桐树岭村北的 2 500 m 范围内，山脊高程除小南庄以南 500 m 处垭口(副坝位置)低于 275 m 外，均在 290 m 以上。临河谷坡平均坡角 30°~40°，除坡脚局部有少量坡积物外，275 m 高程以下岩层基本裸露。左岸坝基沿帷幕灌浆轴线工程地质剖面如图 2-1 所示。

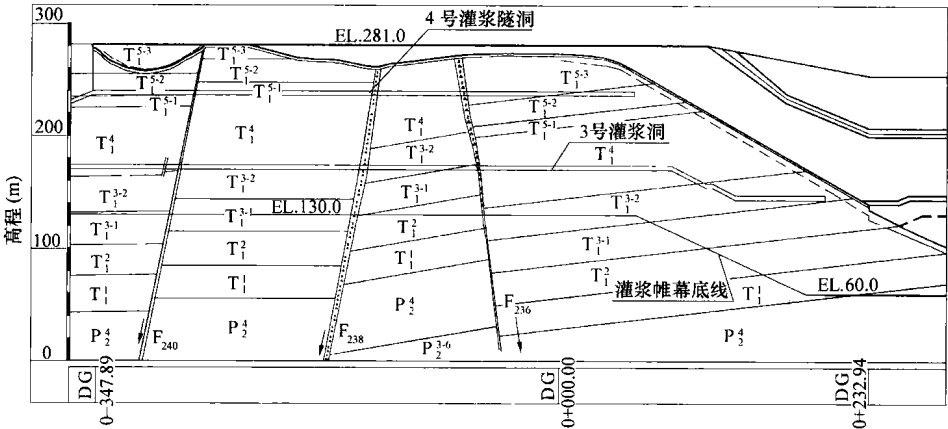


图 2-1 左岸坝基沿帷幕灌浆轴线工程地质剖面图

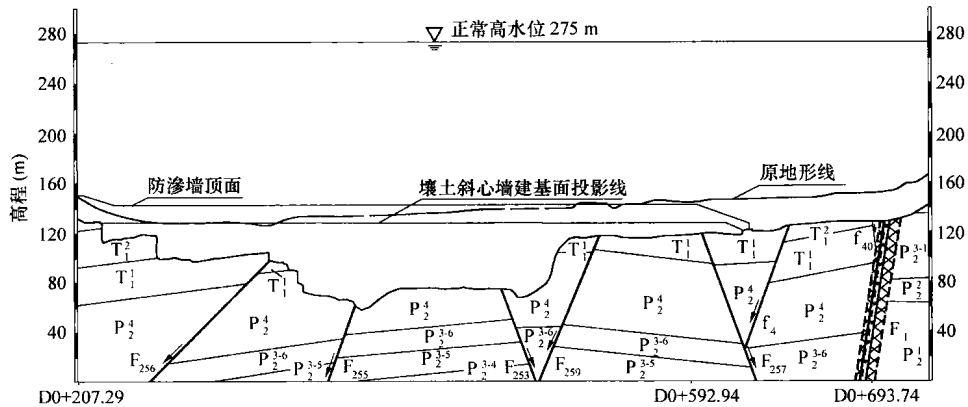
河床段基岩沿帷幕轴线工程地质剖面如图 2-2 所示。

右岸 155 m 高程以下为 I 级阶地和漫滩，155 m 高程以上为基岩谷坡；260 m 高程以下由于受东坡东、西两冲沟切割，形成了三条平行的南北向小山梁，260 m 高程以上山体宽厚，不存在单薄分水岭。右岸坝基沿帷幕灌浆轴线工程地质剖面如图 2-3 所示。

坝址区发育有 I、II、IV 三级阶地，缺失 III 级阶地。

I 级阶地为上迭阶地。以 I 级阶地下部砂卵石层为基座，基座高程 130 m 左右，阶面高程 150 m 左右。其堆积物下部有厚约 5 m 的砂卵石层，上部为细砂、粉细砂和砂壤土，近坡脚处有黄土类堆积。

Ⅱ级阶地为嵌入阶地，阶面高程在 180 m 左右(阶地后缘可达 220 m)，高出河水位约 45 m。基座高程 110~112 m，在基座面以下有黄河古深槽，深 50~60 m，最深点近 80 m，大坝轴线附近槽底高程为 60 m 左右。其堆积物成分比较复杂，深槽底部为砂卵石和零星分布的孤石及块石，下部(120 m 高程以下)为细砂及砂卵石，120~140 m 之间以砂卵石为主，140~170 m 之间以灰黄色轻、中粉砂质壤土为主。在阶地前缘夹有 2~8 m 及 6~8 m 的粉土或砂壤土层。



二、地层岩性

坝址区出露的基岩地层主要为：二叠系上统(P₂)和三叠系下统(T₁)，三叠系中统(T₂)仅在局部有小面积分布。各岩组岩性及分布范围见表 2-1。根据典型剖面统计结果，T₁¹~T₁⁶岩组共包含约 356 个单层。

表 2-1 坝址区各岩组岩性及分布

地 系	层 统	岩组 代号	岩层 代号	厚度 (m)	岩 性 特 征		说 明
三 叠 系	中 统	二 营	T ₂ ¹		坝址区小面积出露。该岩组底部为黄绿、灰绿色砂岩，风化后呈杏黄色，出露厚度约 10 m		左岸小南庄、右岸东苗家
			和 尚 沟	T ₁ ⁷⁻⁴	>41	棕红色、砖红色粉砂质黏土岩为主，夹厚层钙质细砂岩，上部细砂岩夹层较多，近互层状	左岸小南庄以北及风雨沟以西
	T ₁ ⁷⁻³	66.4		紫红色钙质细砂岩与钙泥质粉砂岩互层，夹有粉砂质黏土岩			
	T ₁ ⁷⁻²	42		棕红色泥质粉砂岩、粉砂质黏土岩为主，夹两层紫灰色钙质细砂岩			
	T ₁ ⁷⁻¹	45		紫灰色细砂岩为主，夹砖红色粉砂质黏土岩或泥质粉砂岩			
	T ₁ ⁶	T ₁ ⁶⁻³	55 ~ 60	中、下部以砖红色厚层、巨厚层状泥质、钙泥质粉细砂岩为主，夹中厚层—厚层状钙质细砂岩，泥质粉砂岩中富含钙质结核，局部富集成层。上部为巨厚层泥钙质砂岩与粉砂岩互层	左岸山梁上部、风雨沟以西及洞群出口地段		
		T ₁ ⁶⁻²	7 ~ 9	紫灰色厚层、巨厚层状钙质细砂岩，有时夹少量泥质粉砂岩薄层			
		T ₁ ⁶⁻¹	50 ~ 60	砖红色厚层、巨厚层状泥质粉砂岩为主，夹多层(薄层—中厚层)钙质细砂岩，泥质粉砂岩中含有钙质结核，有时富集成层			
	下 统	刘 家 沟	T ₁ ⁵	T ₁ ⁵⁻³	28 ~ 33	中上部以紫红色厚层、巨厚层状钙硅质细砂岩为主，夹薄层钙泥质粉砂岩；中下部以紫红色厚层、巨厚层状钙质、泥钙质粉细砂岩为主，夹少量中厚层及薄层泥质粉砂岩	左岸岸坡及风雨沟以东，右岸 F ₂₃₀ 断层以南，高程 260 m 以上，F ₁ 断层以北猪娃崖
				T ₁ ⁵⁻²	20	紫红色厚层、巨厚层硅质细砂岩为主，夹薄层粉砂岩及粉砂质黏土岩	
				T ₁ ⁵⁻¹	10	紫红色中厚层状硅质细砂岩与钙泥质粉砂岩或粉砂质黏土岩互层，是刘家沟地层中软岩比例最高的地层，达 40%左右，且多分布在下部，上部仅占 10%左右，且其岩性增多为泥质粉砂岩	
			T ₁ ⁴	58 ~ 66	紫红色厚层、巨厚层状硅质、钙硅质石英细砂岩，有少量钙质细砂岩夹薄层泥质粉砂岩或粉砂质泥岩(相变较大，局部呈中厚层状，亦可尖灭)。石英砂岩中石英含量达 90%以上，是坝址区坚硬岩石占比例最高的地层，软岩仅占 1.6%左右		
			T ₁ ³	T ₁ ³⁻²	30	紫红色厚层、巨厚层状泥钙质、钙泥质粉细砂岩为主，夹厚层、中厚层钙质硅质细砂岩。顶部夹有薄层至中厚层粉砂质泥岩。距层顶 7 m 左右往往有一层葡萄状钙质砾岩，称为“顶部砾岩”。软岩分布在顶部砾岩以上，所占比例可达 45%左右，顶部砾岩以下，主要为平均饱和单轴抗压强度 Rc>60 MPa 的硬岩	
				T ₁ ³⁻¹	28~31	紫红色厚层、巨厚层状硅质、钙硅质石英细砂岩(石英含量 >75%)为主，夹薄层泥质粉砂岩与粉砂质页岩	
			T ₁ ²	28~32	紫红色厚层、巨厚层状钙质细砂岩为主，夹少量薄层泥质粉砂岩与中厚层状钙质砾岩，中部夹一层 2 ~ 5 m 厚的钙质砾岩，称为标志层(又称中部砾岩)，砂岩中常见砂岩和页岩同生砾。岩石中均含有薄膜状、土状针铁矿，岩石呈棕红色	左岸岸坡下部河床覆盖层下及深槽两侧	
T ₁ ¹	30	暗紫红色厚层、巨厚层状钙质、泥钙质粉细砂岩，夹薄层泥岩透镜体，胶结物中含针铁矿，粉细砂岩中常见零星分布的扁球状同生砾					

续表 2-1

地 层		岩组	岩层	厚度	岩 性 特 征	说 明	
系	统	组	代号	代号			(m)
二 叠 系	上 统	石千峰组	P ₂ ⁴		54.81 ~ 68.17	厚层—巨厚层紫红色粉砂质黏土岩为主，夹有薄层黄绿、黄灰色粉砂岩及细砂岩，下部 3~6 m 黄绿色砂岩，近底部为砖红色粉砂质黏土岩，底部为结核状泥灰岩(俗称钙质砾岩)	河床深槽、右坝肩及风雨沟口
			P ₂ ³		85.19 ~ 136.9	暗紫红色粉砂质黏土岩与黄绿色砂岩，呈互层状，可细分为六层：P ₂ ³⁻¹ 、P ₂ ³⁻³ 、P ₂ ³⁻⁵ 为暗红色粉砂质黏土岩地层，其中 P ₂ ³⁻⁵ 下部往往夹有一至二层黄绿色砂岩；P ₂ ³⁻² 以钙硅质中、粗砂岩为主，夹薄层砾岩；P ₂ ³⁻⁴ 、P ₂ ³⁻⁶ 以泥质、钙泥质细砂岩为主，可相变为两层砂岩夹一层粉砂质黏土岩	右岸 260 m 高程以下
		上石盒子组	P ₂ ²		49.19 ~ 54.57	灰黄、灰白色硅质中粒砂岩及细砂岩，夹砾质粗砂岩。砂岩中石英含量占 70%，除中部夹 4~5 m 的杂色黏土岩外，岩性均一、坚硬，往往形成陡壁地形	小清河岸边
			P ₂ ¹			灰褐、黄绿、灰绿与黄灰色绢云母粉砂质页岩与角闪石绢云母泥质页岩，夹有长石中细砂岩	小清河河谷

(一)第四系(Q)

(1)中更新统下段(al~plQ₂¹): 分布于右岸寺院坡一带古夷平面上。上部为棕黄、棕红色黄土，岩性主要为中—重粉质壤土，下部为棕红或棕黄色粉质黏土，底部为砂砾石层，该段与下伏基岩呈不整合接触。

(2)中更新统上段(al~plQ₂²): 主要分布于左岸 275 m 高程以上的Ⅳ级阶地上。上部为棕黄色粉质壤土夹棕红色条带和钙质结核层，下部为砂砾石层，砾石成分复杂。

(3)上更新统下段(alQ₃¹): 分布于右岸Ⅱ级阶地及河床下部。上部为灰黄色轻—中粉质壤土；下部为砂层、砂砾石层。

(4)上更新统上段(eol~dlQ₃²): 包括风成的马兰黄土及坡积成因的次生黄土，岩性为灰黄色均质具大孔隙的轻粉质壤土。主要分布在Ⅱ级以上各级阶地的表面，厚一般 3~5 m。

(5)全新统(Q₄): 以近代河流冲积砂、卵石、粉细砂、壤土为主，堆积于河床上部及Ⅰ级阶地上。

(二)右岸坝基

河床砂卵石层与右岸基岩的分界在大坝轴线桩号 D0+626.54 附近，以南为基岩，以北为砂卵石层。右岸坝基山体地质剖面如图 2-4 所示。F₁断层以北覆盖层下为 T₁¹、T₁² 岩组，产状：走向 345°，倾向 NE，倾角 7°~9°；F₁断层以南，心墙区两侧基岩则为 P₂²、P₂³、P₂⁴ 岩组，产状：走向 320°~330°，倾向 NE，倾角 7°~9°。

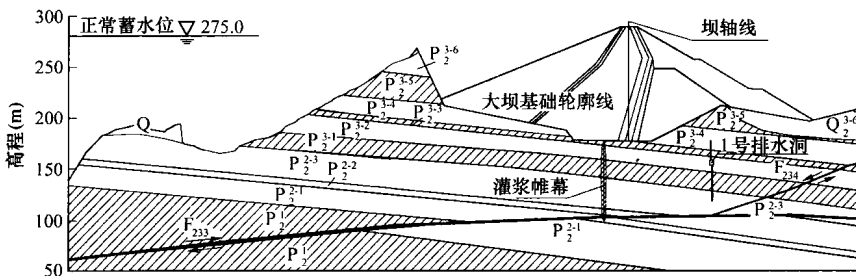


图 2-4 右岸坝基山体地质剖面图

(三)左岸坝基

左岸坝基自上而下依次为 T_1^{6-1} ~ T_1^{3-1} 岩组。左岸坝基山体地质剖面如图 2-5 所示。各岩组底面高程分别为: T_1^{6-1} 岩组 265.5 ~ 270 m; T_1^{5-3} 岩组 240.1 ~ 243.8 m; T_1^{5-2} 岩组 225 ~ 231.5 m; T_1^{5-1} 岩组 216.9 ~ 222.9 m; T_1^4 岩组 168.2 ~ 178.2 m; T_1^{3-2} 岩组 141.4 ~ 154.4 m; T_1^{3-1} 岩组分布在 130 m 以上。地层产状: 走向 $320^\circ \sim 330^\circ$, 倾向 NE, 倾角 $8^\circ \sim 9^\circ$ 。

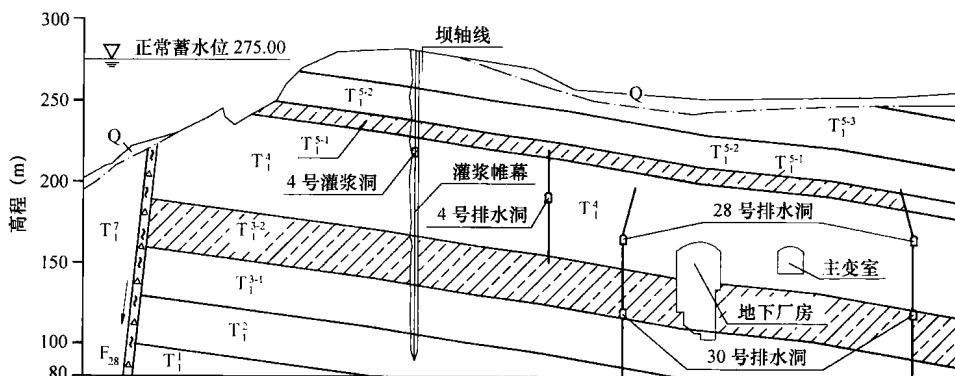


图 2-5 左岸坝基山体地质剖面图

(四)河床段坝基

河床段覆盖层厚度一般为 10 ~ 30 m, 最大厚度可达 70 ~ 80 m(深槽部位)。除河流冲积砾石层、砂层外, 还分布有岸边坡积层、沟口洪积层以及冲—洪积交互层。

河床冲积层自上而下可分为表部砂层、上部砂砾石层、夹砂层、底砂层和底部砂砾石层。河床冲积层下为下伏基岩。

1. 表部砂层

表部砂层分布于右岸高漫滩及坝基下游左岸滩地上, 厚度 3 ~ 7 m, 为极细砂、细砂层, 底部有少量中砂、中粗砂层。层底高程 130 ~ 135 m。属第四系全新统沉积物, 为疏松—中密砂层, 在施工时已被挖除。

2. 上部砂砾石层

上部砂砾石层分布于河床中部, 顶面高程 125 ~ 138 m, 厚度 30 ~ 45 m。砾石成分主要为远距离搬运的石英砂岩、石英岩, 其次为玄武—安山岩类, 夹少量当地砂岩孤石。含砂率一般为 20% ~ 30%, 以极细砂为主, 约占砂量的 80% 以上。泥土(小于 0.05 mm 的粒级)含量一般为 3% ~ 8%。砂的矿物成分以石英长石为主, 含少量岩屑, 不均匀系数一般都比较大。

为查明砂砾石的颗粒组成情况, 地下水位以上利用三个浅竖井取样颗分, 地下水位以下为管钻取样颗分。颗分成果根据坝基各部位含砂率大小进行分区汇总。砂砾石层大于 2 mm 的粒级中, 20 mm 以上的占 70% 左右, 2 ~ 20 mm 的砾石占 10% 左右, 缺乏中间粒径。管钻颗分样由于粗颗粒被击碎含量减少, 40 mm 以下的颗粒相应增加。含砂率大于 30% 的砂砾石主要分布在坝轴线以下的两岸边, 而左岸面积较大。河床中部 G₀₅、T₄₅₈ 号孔顺河一带局部层位含砂率亦相对较高。