

XIAOLANGDI SHUILI SHUNIU ANQUAN JIANCE FENXI

小浪底水利枢纽 安全监测分析

——黄海高程 270 m 水位运用

王琳 宋书克 魏皓 于永军 张宏先 编著



黄河水利出版社

小浪底水利枢纽安全监测分析

——黄海高程 270 m 水位运用

王 琳 宋书克 魏 皓 于永军 张宏先 编著

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书共 11 章,主要包括小浪底水库蓄水以来,尤其是库水位首次达到 270 m 高程时,主坝渗流、主坝变形、两岸山体渗流、进水口高边坡、进水塔、出水口高边坡、消力塘、地下厂房、库区滑坡体监测分析等。本书着重对高心墙土石坝在 270 m 水位以及历年调水调沙库水位变化 30 ~ 40 m 水头的情况下,进行主坝及两岸山体渗流分析、主坝变形规律及反馈分析、高边坡稳定分析等,旨在对 275 m 水位枢纽运行管理进行指导和预测,分析成果对于其他类似工程具有借鉴意义。

本书可供大坝安全监测、水利水电工程等专业的设计、施工及运行管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

小浪底水利枢纽安全监测分析:黄海高程 270 m 水位运用/王琳等编著. —郑州:黄河水利出版社,2014.9

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0691 - 4

I. ①小… II. ①王… III. ①黄河 - 水利枢纽 - 安全监测 - 分析 IV. ①TV632.613

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 316685 号

策划编辑:简群 电话:0371 - 66026749 E-mail:W_jq001@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:18.5

字数:427 千字

印数:1—1 000

版次:2014 年 9 月第 1 版

印次:2014 年 9 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

本书编委会

主 编:王 琳

副 主 编:宋书克 魏 皓

编写人员:王 琳 宋书克 魏 皓 于永军 张宏先

苏 畅 张再虎 王 磊 陈立云 蔡勤学

蔡 路 王 佳 王小霞 赵子涛

前 言

小浪底水利枢纽位于黄河中游三门峡以下约 130 km 干流河道最后一个峡谷的出口处,是黄河治理开发的关键性工程。小浪底水利枢纽控制流域面积 69.4 万 km^2 ,占黄河流域面积(不含内流区)的 92.2%,控制黄河天然年径流总量的 87% 及近乎 100% 的黄河泥沙。小浪底水利枢纽的开发目标是“以防洪(包括防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电,蓄清排浑,除害兴利,综合利用”,属大(1)型水利工程。水库正常蓄水位 275 m,总库容 126.5 亿 m^3 ,其中淤沙库容 75.5 亿 m^3 ,长期有效库容 51.0 亿 m^3 (防洪库容 40.5 亿 m^3 ,调水调沙库容 10.5 亿 m^3)。

小浪底水利枢纽主体工程于 1994 年 9 月开工,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 日首台机组发电,2001 年 12 月 31 日最后一台机组投入运行,2009 年 4 月 7 日通过国家发展和改革委员会与水利部共同主持的竣工验收。工程运行 10 余年来,发挥了巨大的社会效益、生态效益和经济效益。

小浪底水利枢纽安全监测系统主要由大坝安全监测、水文泥沙测验、渗漏水质监测和地震监测等组成。小浪底水利枢纽将主坝渗流、变形、高边坡稳定及厂房围岩稳定作为监测的重点,同时关注近坝区滑坡体监测分析和安全评价的研究。

本书全面、系统地分析总结了小浪底水库蓄水以来,尤其是水库水位首次蓄至黄海水位 270 m 高程以来的监测成果。全书共分 11 章,对主坝渗流、主坝变形、两岸山体渗流、进水口高边坡、进水塔、出水口高边坡、消力塘、地下厂房、库区滑坡体监测分析等方面进行系统的整编、研究。本书内容丰富、实用性强,是一部关于高心墙土石坝高水位运行以来安全监测成果系统分析研究的专著,希望能对类似工程的运行管理有所指导和借鉴。

本书编著者均为长期工作在生产一线的专业技术人员,亲历了小浪底工程建设全过程,肩负小浪底水利枢纽运行管理和安全监测的重任,参加了小浪底水利枢纽渗控安全鉴定、技术评估、技术鉴定和竣工验收等。本书凝聚了编著者在从事安全监测工作中的经验和体会,尽管不乏浅薄,但源于完整、系统、弥足珍贵的监测数据,希望能为水工建筑物安全监测和枢纽的安全稳定运行尽绵薄之力。

限于编著者水平,本书内容难免有疏漏和谬误之处,敬请广大读者批评指正。

编著者

2013 年 11 月

目 录

前 言

第一章 概 述	(1)
第一节 工程概况	(1)
第二节 枢纽区主要工程地质条件及水文地质分区	(2)
第三节 大坝安全监测系统概况	(7)
第四节 水库运用方式	(13)
第二章 主坝渗流监测分析	(18)
第一节 渗流监测概况	(18)
第二节 主坝坝基渗流分析	(24)
第三节 主坝坝体渗压分析	(52)
第四节 主坝渗流统计模型分析	(65)
第五节 主坝坝基渗流监测资料反馈分析	(71)
第三章 主坝变形监测分析	(86)
第一节 外部变形测点布置	(86)
第二节 主坝垂直位移监测分析	(87)
第三节 主坝水平位移监测分析	(95)
第四节 主坝变形资料反馈分析	(100)
第四章 两岸山体渗流监测分析	(110)
第一节 概 况	(110)
第二节 监测设施布置	(111)
第三节 两岸山体防渗补强方案及实施效果	(113)
第四节 渗流监测资料分析	(122)
第五节 渗压监测资料分析	(125)
第六节 渗漏水水质监测分析	(132)
第五章 进水口高边坡监测分析	(134)
第一节 监测布置	(134)
第二节 锚索测力监测分析	(135)
第三节 内部位移观测资料分析	(139)
第四节 进水口高边坡 250 m 高程马道视准线监测分析	(145)
第五节 进水口高边坡渗压监测分析	(146)
第六章 进水塔监测分析	(148)
第一节 监测布置	(148)
第二节 塔体及基础变形监测分析	(149)

第三节	接缝开合度监测分析	(159)
第四节	塔基扬压力及动水压力观测资料分析	(161)
第五节	塔基应力及塔内温度监测分析	(164)
第七章	出水口高边坡监测分析	(168)
第一节	监测布置	(168)
第二节	变形监测分析	(168)
第三节	锚索应力监测分析	(175)
第八章	消力塘监测分析	(181)
第一节	监测布置	(181)
第二节	位移监测分析	(182)
第三节	消力塘锚杆应力监测分析	(185)
第四节	消力塘渗压测值分析	(188)
第九章	地下厂房监测分析	(196)
第一节	地下厂房概况	(196)
第二节	变形监测分析	(196)
第三节	围岩和吊车梁应力监测分析	(203)
第四节	围岩渗流监测分析	(209)
第十章	小浪底水库近坝区滑坡体监测分析	(212)
第一节	概 况	(212)
第二节	东苗家滑坡体监测分析	(217)
第三节	1 号滑坡体监测分析	(234)
第四节	2 号滑坡体监测分析	(251)
第五节	大柿树变形体监测分析	(264)
第十一章	结 论	(282)
参考文献		(286)

第一章 概 述

第一节 工程概况

小浪底水利枢纽位于河南省洛阳市以北 40 km 黄河中游最后一段峡谷的出口,是治理黄河的控制性骨干工程,控制流域面积 69.4 万 km^2 ,占黄河流域面积(不含内流区)的 92.2%。正常运用水位 275 m,最大坝高 160 m,总库容 126.5 亿 m^3 ,其中长期有效库容 51.0 亿 m^3 ,淤沙库容 75.5 亿 m^3 ,属国家大(1)型水利工程,主要建筑物为一级建筑物。枢纽按百年一遇洪水导流,千年一遇洪水设计,万年一遇洪水校核。小浪底水库多年平均入库流量 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 。设计多年平均入库沙量为 13.23 亿 t,小浪底实测最大含沙量为 $941 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。小浪底水利枢纽的开发目标是“以防洪(包括防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电,蓄清排浑,除害兴利,综合利用”。

小浪底水利枢纽设计正常蓄水位 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。正常蓄水位 275 m 时最大泄流能力 $17\,327 \text{ m}^3/\text{s}$,正常死水位 230 m 时泄流量 $8\,048 \text{ m}^3/\text{s}$,非常死水位 220 m 时泄流量 $7\,056 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

小浪底水利枢纽在黄河治理中具有重要的战略地位,水沙条件特殊,地质条件复杂,水库运用方式严格。枢纽主要建筑物由拦河大坝、泄洪排沙建筑物和引水发电系统三大部分组成。主坝为壤土斜心墙堆石坝,最大坝高 160 m,坝顶长 1 667 m,坝下混凝土防渗墙 $21\,093 \text{ m}^2$,最大造孔深度 81.9 m,墙厚 1.2 m;副坝为壤土心墙坝,最大坝高 45 m,坝顶长 170 m。泄洪排沙系统包括进水塔群,由导流洞改建的 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 条正常溢洪道和 1 条非常溢洪道,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。其总体布置特点鲜明:斜心墙堆石坝坐落在深厚覆盖层基础上;所有泄洪、发电及引水建筑物均集中布置在相对比较单薄的左岸山体;采用以具有深式进水口的隧洞群泄洪为主的方案,9 条泄洪洞总泄流能力 $13\,563 \text{ m}^3/\text{s}$,占总泄流能力的 78%,其中 3 条泄洪洞为由导流洞改建的多级孔板消能泄洪洞;所有泄洪、发电及引水建筑物的 16 个进口错落有致地集中布置在 10 座进水塔内,9 条泄洪洞和 1 座陡槽式溢洪道采用出口集中消能的方式;采用以地下厂房为核心的引水发电系统。

电站安装 $6 \times 300 \text{ MW}$ 混流式水轮发电机组,总装机容量 1 800 MW。电站主接线采

用双母线双分段带旁路接线方式,电压等级为 220 kV,出线 6 回,是河南电网重要的调频、调峰和事故备用电站。金属结构设备集中布置在进水塔群、孔板洞中闸室、排沙洞出口闸室、溢洪道、地下厂房尾水闸室和电站尾水出口等部位。共有 124 个孔口,各种闸门 72 扇,拦污栅 26 扇,启闭机 74 台(套)。

小浪底水利枢纽投入运用后,黄河下游的防洪标准从约 60 年一遇提高到 1 000 年一遇,基本解除了黄河下游的凌汛威胁;利用水库 75.5 亿 m^3 的拦沙库容,在 20~25 年内可使下游河床基本不淤积抬升;平均每年可增加 17.9 亿 m^3 的调节水量,提高黄河下游的用水保证率;小浪底水电站装机 1 800 MW,设计多年平均年发电量前 10 年 45.99 亿 kWh,10 年后为 58.51 亿 kWh,在基本以火电为主的河南电网中担任调峰,是理想的调峰电站。

第二节 枢纽区主要工程地质条件及水文地质分区

一、坝址区地形地质条件

小浪底水利枢纽选定的三坝线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,小浪底水利枢纽下游 8 km 为焦枝铁路桥,焦枝铁路桥以东是广袤的黄淮海大平原。坝址处河谷宽约 800 m,河床右岸为滩地和黄土二级阶地。右岸山势陡峻,高程在 380~420 m,坡度为 $40^\circ\sim 50^\circ$;左岸山势平缓,高程为 290~320 m,且有高程为 240 m 左右的垭口。受沟道切割的影响,形成单薄分水岭。

小浪底坝址区主要出露的地层为二叠系上石盒子组、石千峰组黏土岩和砂岩,三叠系下统刘家沟组及和尚沟组砂岩、粉砂岩。第四系主要是黄土和砂砾石层。坝址区地层褶皱轻微,断裂构造发育。由于受断距 220 m、顺河向 F_1 断层的切割,河床右岸出露的岩层主要为二叠系砂岩和黏土岩,左岸出露的岩层主要是三叠系砂岩和粉砂岩。河床部分为最大深度达 70 m 的砂砾石覆盖层。坝址处于狂口背斜的东端,其轴部在右坝肩。受背斜褶皱的影响,岩层呈单斜地层以 10° 左右的缓倾角倾向北东。坝址区主要工程地质问题如下。

(一) 河床深覆盖层

河床覆盖层一般深 30~40 m,最大深度达 70 余米。覆盖层上部为松散的 Q_4 粉细砂层,下部为密实的 Q_3 砂砾石层,其间含有粉细砂透镜体,底部为连续的粉细砂层。作为大坝基础的河床覆盖层,其防渗和抗地震液化是设计的关键。

(二) 断裂构造发育

坝址区出露的主要断裂构造自北向南有 F_{461} 、 F_{240} 、 F_{238} 、 F_{236} 、 F_1 、 F_{233} 、 F_{231} 、 F_{230} 及 F_{28} 等。除 F_{28} 的走向为北东向外,其余主要断裂构造均呈上下游方向展布,且大部分为高倾角正断层,将坝区岩体切割成条块状。坝址区节理裂隙发育,其发育程度与岩性和岩层单层厚度有关。砂岩地层较黏土岩地层节理发育。一般每米 1~2 条节理。坝区主要节理

有 NW270°~290°, NW340°~350°, NE10°~20°和 NE60°~70°四组, 倾角 70°~80°, 属于剪切性节理, 一般延伸不长。在每一地段发育有 2~3 组节理。这些断裂构造与建筑物围岩稳定关系密切, 且形成了明显的上下游方向带状渗水的水文地质特征。

(三) 泥化夹层

小浪底坝址区的砂岩层系河湖相沉积, 在砂岩中常夹有黏土岩, 后期受剪切构造作用而发生层间错动。因砂岩刚度较大易沿薄层黏土岩发生剪切错动, 造成黏土岩破碎、泥化现象。泥化层的分布一般以长度 30~50 m、层厚 1~2 cm 者为主。在左岸坝肩山体泥化层有延伸长 200~300 m 的。大量室内外试验表明, 泥化层的力学指标较低, 根据不同的组成和岩性, $f=0.20\sim0.28$, $c=0.005$ MPa。因岩层呈 10°左右的缓倾角倾向下游, 因此在枢纽建筑物区基岩地层中的泥化夹层基本上是控制稳定的关键地层。

(四) 左岸单薄分水岭

坝址左岸山体山势平缓, 上游有风雨沟, 下游有葱沟、瓮沟、西沟和桥沟切割, 岩层主要为三叠系砂岩和黏土岩互层, 岩层中有 F_{236} 、 F_{238} 、 F_{240} 等基本呈上下游方向展布的断层和与分水岭呈北东向斜交的 F_{28} 大断层。岩层节理裂隙发育, 风化卸荷严重。左岸山体和建筑物关系密切, 水库蓄水后, 山体南段存在自身稳定和整个山体的漏水处理问题。

(五) 滑坡和倾倒变形体

由于坝址区岩层为倾向北东的单斜地层, 河谷南岸多发育有倾向河床的滑坡及倾倒变形体。距坝轴线上游 2~3 km 的 1 号和 2 号滑坡体体积分别为 1 100 万 m^3 和 410 万 m^3 ; 坝肩处的东坡滑坡体和坝下游的东苗家滑坡体与枢纽建筑物的安全运用关系十分密切。

(六) 地震

小浪底坝址远源破坏性地震主要来自汾渭地震带和太行山麓地震带, 历史地震 8 级, 震中距为 140~250 km。近源地震以小浪底为中心, 半径 30 km 范围内有封门口和城崖地断裂, 历史地震 5 级。经国家地震局审定, 小浪底坝址区地震基本烈度为 7 度, 主要挡水建筑物的设防烈度为 8 度, 在远源和近源地震共同作用下 10^{-4} 概率最大水平加速度为 0.215g。

二、水文地质分区

(一) 透(含)水层与相对隔水层

坝址区红色碎屑岩系的岩性组合特征为: 中细粒砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质黏土岩互层。砂岩为硬岩, 硅质或硅钙质胶结, 性脆, 裂隙发育, 为透(含)水层; 泥质粉砂岩和粉砂质黏土岩为软岩, 裂隙不发育, 属相对隔水层。各岩组透水性的 大小, 取决于岩组内泥质岩石含量的多少及其组合特性。厚层砂岩为主地层, 构成透(含)水层; 砂岩夹薄层泥质岩石或互层的岩组为弱透水层; 以厚层泥质粉砂岩或粉砂质黏土岩为主的岩组组成相对隔水层。

从整体而言, 由于岩体中夹有弱透水岩层, 一般顺层的渗透性大于垂向的透水性, 因此坝址区岩体从整体上讲应该是层状非均质各向异性渗透结构。

坝址区各组地层渗透性划分如下:

左岸:透(含)水层, T_1^1 、 T_1^2 、 T_1^{3-1} 、 T_1^4 、 T_1^{5-2} 、 T_1^{5-3} ;弱透水层, T_1^{3-2} 、 T_1^{5-1} ;相对隔水层, P_2^4 。

河床:透(含)水层, T_1^1 、 T_1^2 ;相对隔水层, P_2^4 。

右岸:透(含)水层, P_2^2 、 P_2^{3-2} 、 P_2^{3-4} 、 P_2^{3-6} ;相对隔水层, P_2^1 、 P_2^{3-1} 、 P_2^{3-3} 、 P_2^{3-5} 。

(二)地质构造及水文地质分区

1. 断层

枢纽区位于狂口背斜的外倾转折端,岩层呈单斜构造,倾向下游,倾角约 10° 。区内断裂构造比较发育,走向以近 EW 最为发育,其次为近 SN 及 NE,倾角大多在 70° 以上。断层带物质为角砾、断层泥及方解石脉体。区内具有水文地质意义的断层共有 9 条,详见表 1.2.1,其中以 F_{28} 、 F_{461} 、 F_1 3 条规模最大,断距都大于 200 m,断层泥带较宽,在横向上具有相对隔水作用,但其影响带却是强透水的。

表 1.2.1 枢纽区主要断层特性表

编号	产状			断距 (m)	宽度(m)	
	走向	倾向	倾角		断层带	影响带
F_{28}	$45^\circ \sim 55^\circ$	NW	85°	300	4~6	20~30
F_1	$100^\circ \sim 118^\circ$	NE	$73^\circ \sim 85^\circ$	220	5~12	14~20
F_{461}	310°	NE	$80^\circ \sim 88^\circ$	300	4~6	—
F_{236}	$90^\circ \sim 106^\circ$	SW	$70^\circ \sim 87^\circ$	60~85	1.5~6	0~10
F_{238}	$90^\circ \sim 106^\circ$	NE	$80^\circ \sim 85^\circ$	12~30	1.2~8	12~25
F_{240}	$80^\circ \sim 105^\circ$	N	$80^\circ \sim 87^\circ$	2~15	0.5~2	2~3
F_{230}	$90^\circ \sim 100^\circ$	SW	$52^\circ \sim 75^\circ$	50~70	0.5~2.2	10
F_{231}	$103^\circ \sim 110^\circ$	NE	$75^\circ \sim 90^\circ$	0~9	1~2.0	4
F_{233}	$95^\circ \sim 102^\circ$	SW	$65^\circ \sim 80^\circ$	15~17	0.5~2	4

2. 水文地质分区

根据枢纽区内地层岩性、地质构造及水文地质构造的组合条件,从灌浆帷幕布置和排水帷幕设计角度出发,可将 F_{28} 断层以东、 F_{461} 断层以南的区域划分为以下 6 个水文地质区:Ⅰ区, $F_{461} \sim F_{240}$;Ⅱ区, $F_{240} \sim F_{236}$;Ⅲ区, F_{236} —岸边;Ⅳ区,河床;Ⅴ区, $F_1 \sim F_{230}$;Ⅵ区, F_{230} 以右。

1) Ⅰ区

本区分布的基岩地层,下部为三叠系石千峰组(P_2^4),中上部为三叠系刘家沟组($T_1^1 \sim T_1^5$),顶部为和尚沟组(T_1^{6-1})。

P_2^4 岩组为一区域性隔水层,厚 56~68 m,是左坝肩及左岸山体透水岩体下部的隔水底板。

$T_1^1 \sim T_1^5$ 岩组总厚约 250 m,岩性为厚层钙质、硅质细砂岩夹薄层泥质粉砂岩与黏土岩,是一个统一的裂隙透水岩体,也是本区主要的含水层。

T_1^{6-1} 岩组厚 52~57 m,是左坝肩及左岸山体的相对隔水顶板。

本区无较大断层通过,层状透水体和陡倾角的小断层构成本区岩体的基本渗透网络,由于本区南侧 F_{240} 、 F_{238} 、 F_{236} 等几条断层的阻隔,地下水位基本不受黄河水位的影响。

2) II 区(断层交会带水文地质区)

区内分布的基岩地层同 I 区。本区最大特点是:展布 3 条近东西走向的主要断层: F_{240} 、 F_{238} 、 F_{236} 。3 条断层间相距 120 ~ 200 m,主断层间发育有分支断层及次一级小断层,断层影响破碎带几乎连为一体。3 条断层贯通水库的上下游,构成沟通库水向下游渗透的强透水带。

3) III 区(左坝肩水文地质区)

区内的基岩地层分布同 I 区。本区岸坡为风化卸荷带,其厚度可达 50 ~ 80 m。风化卸荷带大大增加了本区岩体的透水性,故地下水位与黄河水位同步变化。

4) IV 区(河床水文地质区)

本区包括河槽及两岸漫滩和一级阶地。南侧以 F_1 断层为界,宽约 500 m。地下水类型主要为覆盖层孔隙潜水及下伏基岩中埋藏的承压水。河床中有基岩深槽,最低槽底高程约 60 m,覆盖层最厚达 70 m 以上,一般厚度 20 ~ 30 m。下伏基岩上部为 $T_1^1 \sim T_1^3$,下部 P_2^4 为黏土岩。本区有多条顺河向小断层展布,因断距小,未能将相对隔水层 P_2^4 错开,从而形成其下 P_2^3 中的砂岩为承压含水层。

F_1 断层顺河向展布,由于断距达 220 m,规模大,因此较厚的断层泥带具有相对隔水性能,但其两侧影响带则是贯通水库上下游的渗漏通道。

5) V 区(右岸水文地质区)

本区为右岸岸坡地段,上游以小清河为界, $F_1 \sim F_{230}$ 间长约 500 m。

区内分布二叠系上统石河子组($P_2^2 \sim P_2^3$)地层。底部 P_2^1 岩组,厚度 130 m 左右,是一区域性隔水层,埋藏较深,在帷幕线附近顶板高程 80 ~ 93 m。中上部为 P_2^2 、 P_2^3 岩组,总厚度 150 m 左右,岩性为紫红色粉砂质黏土岩与黄绿色、灰白色钙质、硅质砂岩互层。砂岩与黏土岩相间排列,构成了本区多个相间的砂岩含水层: P_2^2 、 P_2^{3-2} 、 P_2^{3-4} ,以及多个黏土岩相对隔水层: P_2^{3-1} 、 P_2^{3-3} 、 P_2^{3-5} 。因地层以 7° 倾角向下游倾伏,形成砂岩含水层中的地下水在西侧为层间自由水,向东则逐渐过渡为承压水。各含水层的承压水位: P_2^2 , 142 ~ 187 m; P_2^{3-2} , 143 ~ 211 m; P_2^{3-4} , 186 ~ 213 m。

区内展布 3 条近东西向的断层 F_{230} 、 F_{231} 、 F_{233} ,贯通水库上下游。在地表, F_{231} 与 F_{233} 相距 80 ~ 120 m,构成一个小地堑,地堑内岩体较破碎,为强透水带。各断层 P_2^2 与层相交的部位,是水库集中渗流上溢的通道。

6) VI 区(右岸山地水文地质区)

本区山体雄厚,上游以小清河为界,出露地层以刘家沟组地层 $T_1^1 \sim T_1^5$ 砂岩为主。据长期观测资料,寺院坡 T_{442} 号孔基岩裂隙水位达 270 m,接近水库 275 m 正常高水位,因此本区绕坝渗漏问题不大。

3. 岩体的渗透特性

根据前期各种水文地质勘探试验成果,枢纽区内各岩组及主要断层的渗透系数见表 1.2.2。

表 1.2.2 各岩组及主要断层的渗透系数

序号	岩层	分布位置	渗透系数 (m/d)	序号	岩层	分布位置	渗透系数 (m/d)
1	P_2^4	左岸	0.01	16	P_2^{2-2}	右岸	0.014 8
2	T_1^{1-2}	左岸	0.03	17	P_2^{2-3}	右岸	0.071 4
3	T_1^{3-1}	左岸	0.10	18	P_2^{3-1}	右岸	0.012 8
4	T_1^{3-2}	左岸	0.01	19	P_2^{3-2}	右岸	0.111 3
5	T_1^4	左岸	0.30	20	P_2^{3-3}	右岸	0.021 5
6	T_1^5	左岸	0.053	21	P_2^{3-4}	右岸	0.226 0
7	T_1^6	左岸	0.01	22	P_2^{3-5}	右岸	0.093 5
8	F_{28} 影响带	左岸	10.0	23	P_2^{3-6}	右岸	0.340 0
9	P_2^{3-6}	河床	0.229 6	24	P_2^4	右岸	0.210 0
10	P_2^4	河床	0.14	25	F_{230} 以南	右岸	0.020 0
11	T_1^1	河床	0.227 5	26	F_{230} 断层	右岸	0.003 0
12	T_1^2	河床	0.30	27	F_1 断层	河床	0
13	T_1^{3-2}	河床	0.18	28	F_1 断层破碎带	30 m 高程以上	10.0
14	P_2^1	河床	0.003	29	F_1 断层破碎带	30 m 高程以下	0.010
15	P_2^{2-1}	右岸	0.174 8	30	$F_{236} \sim F_{240}$		0.01 ~ 2.67

4. 岩体的渗透特征

根据枢纽区岩体的水文地质结构和枢纽区的水文地质条件,枢纽区的渗漏表现为以下三个特征:

(1)层状透水:所谓层状透水,是指沿各水文地质区透水岩层产生的渗漏。砂岩中节理比较发育,对库水渗漏有重要影响的节理主要为:

①走向 $270^\circ \sim 290^\circ$,倾向 S ~ SW,倾角 $80^\circ \sim 88^\circ$;

②走向 $60^\circ \sim 70^\circ$,倾向 SE 或 NW,倾角 80° 。

第①组节理在 T_1^4 中的线连通率范围为 33% ~ 65%,平均 47%,裂隙宽度一般为 0.1 ~ 1.0 mm,间距变化在 0.1 ~ 1.5 m,延伸长度 3 ~ 30 m,一般不穿过厚度较大的软岩层。裂隙构成了砂岩岩体中地下水赋存和运移的渗透网络。

(2)带状透水:所谓带状透水,是指沿断层及其两侧影响带产生的渗漏。由于主要构造均呈上、下游方向展布,故沿断层带及两侧影响带形成了明显的渗流通道,这一特征从 1 号排水洞中排水孔出水量的大小可明显看出。

(3)壳状透水:所谓壳状透水,是指沿岩体表部风化卸荷带形成的渗漏。

综上所述,坝区多层状非均质各向异性透水岩体是库水渗漏的基本结构,它们和强透水的断层带及由于风化卸荷作用形成的风化壳岩体共同构成了坝区的渗漏网络。因此,

坝基及左岸山体的渗漏应是层状、带状、壳状三种渗透结构相互组合的结果。

第三节 大坝安全监测系统概况

一、安全监测系统布置

(一)主坝监测项目与布置

主坝是枢纽工程的重点监测建筑物,设有内外部变形、渗流、应力应变和强震等监测项目。监测仪器布置在3个有代表性的横断面和2个纵断面上。3个横断面分别为:A—A断面(D0+693.74),位于F₁断层破碎带处,是监测的重点部位;B—B断面(D0+387.50),位于最大坝高处,覆盖层最深;C—C断面(D0+217.50),位于左岸基岩陡坎处,此处是不均匀沉陷变形的集中部位。2个纵断面分别位于坝轴线和防渗体轴线上。

主坝轴线近似南北走向,设有3个横断面和2个纵断面,共5个主要观测断面。其中A—A、B—B、C—C断面为3个横断面,分别设在左右桩号D0+693.74、D0+387.50和D0+217.50处。B—B断面位于最大坝高处,是坝体典型观测断面。2个纵断面中D—D断面为沿斜心墙轴线断面,E—E断面为沿坝轴线断面,各断面平面布置见图1.3.1。外部变形测点均设在坝体表面,内部变形测点主要设在5个观测断面上。

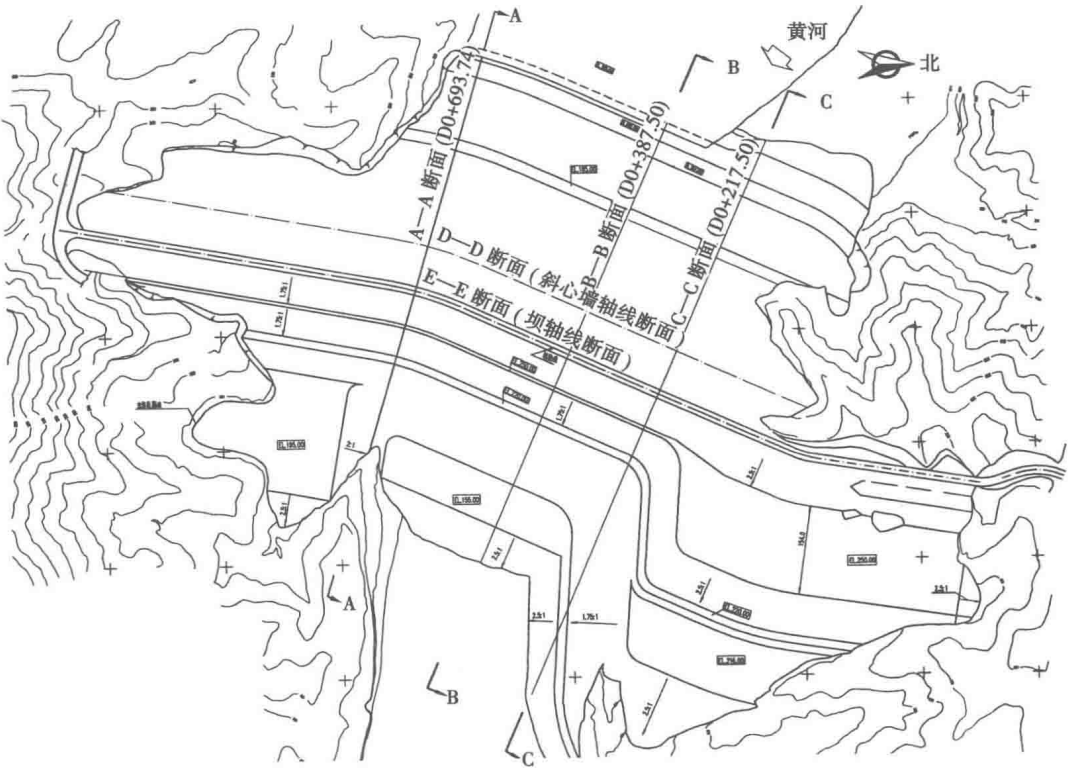


图 1.3.1 主坝各断面平面布置图

1. 外部变形监测

外部变形分为水平变形和垂直变形。水平变形采用视准线法,在坝体上、下游坡面和坝顶共设 8 条视准线。外部变形监测测点布置示意图如图 1.3.2 所示。其中位于上游坝坡正常高水位以下的视准线,仅在施工期和水位下降之后才进行监测。每条视准线的位移标点间距一般为 60 m,左岸陡坎处间距加密为 30 m。沿轴线方向的变形采用测距法测量。垂直变形采用几何水准测量,每个水平位移标点附近设一水准标点。视准线的工作基点,采用变形控制网校测其稳定性。

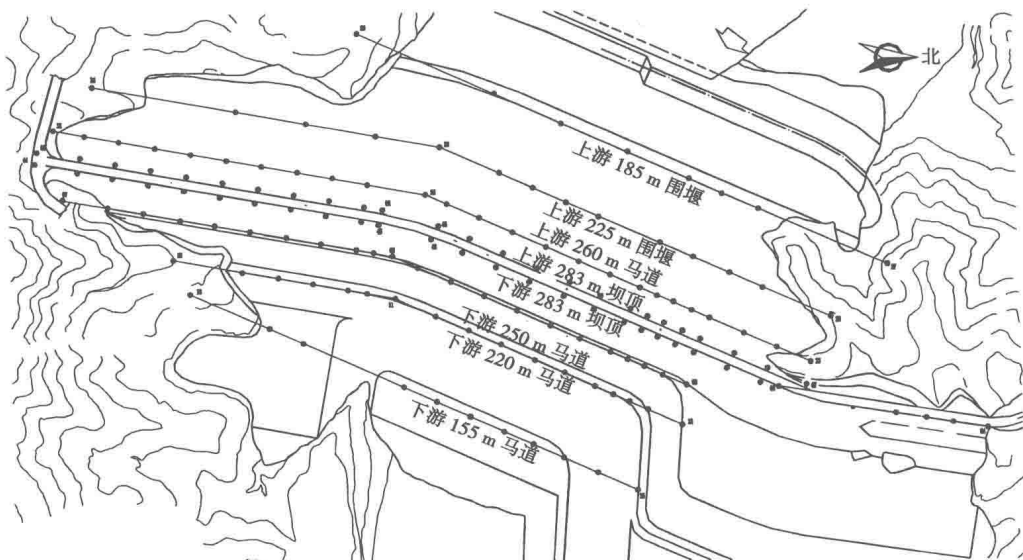


图 1.3.2 外部变形监测测点布置示意图

2. 内部变形监测

主坝内部变形也分为水平变形和垂直变形。水平变形采用测斜仪和堤应变计两种仪器监测,每个断面布置竖向测斜仪 3 套,平行斜心墙方向布置斜向测斜仪 1 套。整个坝体共布置 4 套堤应变计,其中沿坝轴线方向 3 套,沿上、下游方向 B—B 断面底部 1 套。垂直变形采用钢弦式沉降计和利用测斜仪加金属套环构成的固结管配合沉降探头进行监测:在 B—B、C—C 两断面共布置 19 支沉降计,沉降环的布置间距为 3 m。另外,设有 4 套水平方向测斜仪,分布于各断面上,作为垂直变形监测的辅助手段。在斜心墙和坝壳的接触面上、岸坡岩体与坝体的接触面上布置 11 支界面变位计,用以监测其相对变形。

3. 坝体渗透压力和土压力监测

为监测坝体内的孔隙水压力和浸润线分布,同时监测坝壳上游面泥沙淤积情况,在 3 个断面上共布置了 56 支渗压计和 2 支测压管。土压力监测分土中应力和边界土压力监测。前者布置在 B—B 断面内,共 11 组;后者布置在基础界面上,共 4 组。

4. 渗流监测

主坝及其基础的渗流监测,是安全监控的重要项目之一。渗流监测的目的是检验防渗和排水系统的效果,了解大坝各部位的渗流状况,利用渗流监测资料分析坝体、坝基的渗流稳定性,为大坝的稳定复核、反演分析提供必要的渗流数据,并验证大坝所采取渗流

控制方案的效果,借以评价大坝的运行状态。

主坝的渗流监测主要包括坝体渗流监测、坝基渗流监测、绕坝渗流监测以及大坝渗流量监测四个部分。坝体渗流监测主要布置在前述3个监测断面内,与变形及应力监测的布置相一致,以便对坝体的安全状况进行综合分析。坝基渗流监测除在A—A、B—B、C—C 3个横向监测断面的坝基面布置测点外,为了解坝基整体的渗流情况,还在主坝防渗墙和灌浆帷幕、围堰防渗墙、F₁断层以及1号排水洞等重要部位布设了测点。绕坝渗流监测主要是为了监测左右岸山体与岸坡连接部位的渗流状况,在坝体与岸坡的结合面布设了一定数量的测压管。大坝渗流量监测采用分区分段的原则进行,主要可以分为坝体渗流、坝基渗流、两岸绕流三部分。

左右两岸绕坝渗流监测是在两坝肩沿设计渗流线安装测压管进行监测的。自斜心墙后两岸均做有一截渗墙,嵌入基岩0.5 m,两岸绕坝渗流顺截渗墙后的排水沟引向下游,混凝土截渗墙末端做引水渠和量水堰,以监测两岸的渗流量;河床部分的渗流由坝体排水体汇入下游基坑后,渗流量通过设在下游围堰排水涵洞内的量水堰量测。由排水洞回流的渗流量均利用设在两岸排水洞或交通洞内的量水堰进行监测。右岸1号排水洞内设2个量水堰,2号交通洞出口设1个量水堰;左岸在2号、3号排水洞内设2个量水堰,3号交通洞出口设1个量水堰。

5. 混凝土防渗墙监测

混凝土防渗墙分主坝、围堰防渗墙,各设1个监测断面。主坝防渗墙厚1.2 m,最大墙深70 m,插入斜心墙12 m,是主坝的主要防渗结构。上游侧沿墙不同高程设有渗压计和边界土压力计。墙体左、右端头与混凝土齿墙接触部位也设有渗压计,以监测接触带的防渗效果。墙体设有应变计、无应力计、钢筋计等应力应变监测仪器。另外,还设有倾角计进行墙体变形监测。

围堰防渗墙仅设墙体应力应变监测和墙体上、下游渗压监测。

6. 地震反应监测

坝址区基本烈度为Ⅶ度,地震反应监测对象主要为Ⅲ度以上的地震反应。设有2个横向监测断面、1个纵向监测断面和1个基础效应台,共10个监测点。仪器采用三分量强震仪。

(二) 左岸山体监测项目与测点布置

左岸山体监测主要是指近河1.5 km的山体稳定监测,包括山体变形、地下水位、洞群渗流和山体振动监测。

山体表面变形监测采用视准线法进行,工作基点利用测量控制网校测。

山体内部变形监测采用静力水准系统和引张线配合正倒垂线进行。引张线和静力水准系统均设在3号排水廊道内,引张线端点设有倒垂线。

为监测水库蓄水后左岸山体的地下水位、灌浆帷幕的防渗效果、排水洞的排水效果、地下水位与库水位之间的时效关系、地下洞室群的外水压力以及中闸室的安全,共布设12支测压管和60多支渗压计。渗流量采用量水堰配微压计分区分段进行量测。

山体振动监测在2号孔板洞区和出口170.00 m高程平台上分别设1台三分量强震仪进行监测。

(三) 进水塔塔体监测项目与测点布置

1. 塔体与基础变形监测

塔体变形采用视准线、引张线、静力水准点、几何水准点和正倒垂线监测,由此构成完整的塔体变形监测系统。

视准线设于塔顶,有 16 个位移标点,其端点与坝区三角控制网相连。引张线设置于高程 276.50 m 廊道内,全长 245 m,共有 13 个测点。在高程 190.00 m 纵、横向交通廊道内布设 1 套静力水准点和几何水准点,以监测其垂直变形。正、倒垂线共 3 条,分别位于 1 号、3 号明流塔和 2 号发电塔段。

监测塔基垂直变形的仪器有 3 套多点位移计,分别布置在 1 号、2 号、3 号发电塔段,仪器最深的测点在塔基以下 40 m。

各塔体间还布置了 27 支测缝计,以测量施工缝开合度。

2. 塔基应力监测

在 1 号、2 号、3 号发电塔段的基础面上,共布置 9 支总压力盒、9 支渗压计,分别监测塔基面上所承受的总压力和水压力。

3. 塔体动水压力及地震反应监测

在地震作用下,塔体上游的动水压力会影响塔体的安全运用,因此在其上游面 220.00 m 和 260.00 m 高程设置了 6 支渗压计,以监测动、静水压力的影响。地震反应将由设在塔顶和塔基不同部位的 4 台强震仪进行监测。

(四) 孔板洞监测项目与测点布置

孔板洞洞径 14.5 m,孔板口直径为 10.0~10.5 m,洞内流速一般为 10 m/s,孔板口收缩处为 20 m/s,中闸室后最高达 35 m/s。这种大洞径洞内孔板消能的结构型式在国内外均少见,由此而引起的振动、气蚀、脉动压力等问题需要进行监测。另外,由于洞径大,围岩的稳定性及衬砌混凝土应力状态也是安全监测设计的重点。为此,将 3 条孔板洞作为重点监测项目,布置相同的仪器,以便对比监测成果,验证设计和试验结果,并监控其安全运行。

1. 应力应变及围岩稳定监测

应力应变监测重点在第三级孔板和其后半倍洞径处,以及穿断层破碎带部位。3 个监测断面共布置 32 支钢筋计、24 支混凝土应变计。在其中的 2 个断面上布置了渗压计和多点位移计,用以监测洞外水压力和围岩的稳定状况。

2. 水力学及结构振动监测

水力学监测项目有水流脉动压力、时均压力和气蚀监测。在孔板段和中间室段沿程共埋设 7 支脉动压力计、10 支时均压力计、4 支水听器。结构振动采用强震仪监测,仪器布置在第三级孔板中,接收装置设在中间室内。

由于水力学监测属非经常性和不连续的监测项目,考虑到监测工作的灵活性和间歇性,为避免仪器损坏和老化,施工时仅将仪器底座和电缆预埋入混凝土中,待监测工作开始时临时安装仪器。

(五) 明流洞监测项目与测点布置

3 条明流洞中,1 号明流洞位置最低,地质条件最差,洞内最大流速可达 40 m/s,故选